

Министерство образования Республики Беларусь  
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет»

# **МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы Международной  
научно-технической конференции  
(Могилев, 25–26 апреля 2024 года)

Могилев  
«Белорусско-Российский университет»  
2024

УДК 001  
ББК 73  
М34

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М. Е. Лустенков* (гл. редактор); д-р техн. наук, проф. *В. М. Пашкевич* (зам. гл. редактора); канд. техн. наук *С. В. Данилов*; канд. физ.-мат. наук, доц. *В. Г. Замураев*; канд. техн. наук, доц. *А. С. Коваль*; канд. техн. наук, доц. *А. О. Коротеев*; канд. техн. наук, доц. *И. В. Лесковец*; канд. физ.-мат. наук, доц. *И. И. Маковецкий*; канд. техн. наук, доц. *А. П. Прудников*; канд. техн. наук, доц. *С. С. Сергеев*; канд. ист. наук, доц. *Е. П. Цумарева*; канд. техн. наук, доц. *В. М. Шеменков*; д-р техн. наук, доц. *А. И. Якимов*; канд. техн. наук, доц. *Д. И. Якубович*; *И. В. Брискина* (отв. секретарь)

**Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии:**  
М34 материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – 507 с. : ил.  
ISBN 978-985-492-306-2.

В сборнике материалов конференции рассмотрены вопросы разработки прогрессивных технологических процессов в машиностроении, создания систем искусственного интеллекта для управления качеством и техническим уровнем изделий машиностроения, механизмы для технологической оснастки. Приведены результаты исследований в области современных технологий и машин сварочного производства, получения и обработки новых материалов и покрытий. Рассмотрены вопросы проектирования, производства и эксплуатации транспортных средств. Приведены результаты исследований в области ресурсосберегающих технологий, конструкций и материалов в строительстве; высшей математики; математического моделирования; информационных технологий и измерительной техники для контроля и диагностики объектов. Рассмотрены экономические аспекты деятельности промышленных предприятий Республики Беларусь, а также вопросы гуманитарной составляющей в вузах технико-технологического профиля.

Сборник предназначен для инженерно-технических и научных работников, аспирантов и студентов вузов.

УДК 001  
ББК 73

ISBN 978-985-492-306-2

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### Пленарное заседание

ГЕРАСИМЕНКО Н. В., ТРУХАЧЕВ Ф. М. Исследование свойств солитонов в линиях электропередач с нелинейной емкостью.....	20
МИСНИК А. Е. Мета-ассоциативные графы как инструмент онтологического инжиниринга кибер-физических систем.....	24
ШЕЛЕГ В. К., ДОВГАЛЕВ А. М. Наноструктурирование поверхностного слоя деталей машин совмещенной магнитно-динамической обработкой.....	28

### Секция 1. Технология и оборудование машиностроения, автоматизация технологических процессов и производств, мехатроника и робототехника

АНТОНЮК В. Е., САНДОМИРСКИЙ С. Г., ТИМОШЕНКО Н. П. Особенности расчета массы исходной заготовки в автоматизированной линии кольцераскатки.....	32
АНТОНЮК В. Е., САНДОМИРСКИЙ С. Г., ЯВОРСКИЙ В. В. Причины возникновения и пути снижения напряженного состояния заготовок при кольцераскатке.....	34
ГНЕВАШЕВ А. А., ПЕТРОВ П. А., БУРЛАКОВ И. А. Анализ течения металла при горячем изотермическом выдавливании поковки детали «поршень» .....	36
ДАЙ ВЭНЬЦИ, КОРОЛЁВ А. Ю., АЛЕКСЕЕВ Ю. Г. Экспериментальные исследования процесса формообразования ступенчатых поверхностей трубчатых ультразвуковых волноводов.....	38
ДОВГАЛЕВ А. М., СВИРЕПА Д. М. Упрочнение деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием в специальной технологической среде.....	41
ЖОЛОБОВ А. А., ШИШОВА О. Н. К вопросу определения оптимальной конструкции инструмента при высокоскоростном фрезеровании отверстий.....	42
ИЛЬЮШИНА Е. В., ПЕЧКОВСКАЯ О. Е., КООВИТ В. С., МУХА А. В. Исследование топографии поверхности алюминиевых заготовок после упрочняющей обработки пневмоударом.....	44
ИЛЬЮШИНА Е. В., ЮШКЕВИЧ Н. М., КООВИТ В. С., МУХА А. В. Основы проектирования инструмента для упрочняющей пневмоударной обработки.....	45
КАПИТОНОВ А. В., КУРБАННАЗАРОВ А. Ш., ДРОЗДОВ В. С. Влияние углов подъема многопериодных дорожек на точность и КПД планетарных передач с телами качения.....	46
КАПИТОНОВ А. В., КУРБАННАЗАРОВ А. Ш., ДРОЗДОВ В. С. Оценка напряжений и деформаций в шариковом и роликовом зацеплении планетарных передач.....	47

КОМАРОВСКАЯ В. М., ЛЕВШУКОВ А. П., САКОВСКИЙ В. И., ДУБОЛЕКО Ю. А. Промышленные испытания многогранных неперетачиваемых пластин с вакуумно-плазменными покрытиями.....	48
КОРОЛЁВ А. Ю., СЕНЧЕНКО Г. М. Морфология внутренних поверхностей при электролитно-плазменной обработке.....	50
КОСТЮКОВИЧ Г. А., ПОПРУКАЙЛО А. В., ОВЧИННИКОВ Е. В., ЛИННИК Д. А. Повышение прочности крестовин карданных передач.....	52
ЛИТВИНОВ А. Е., СИЗО А. А. Определение режимов резания ленточнопильных отрезных станков.....	54
НИСС В. С., ИВАНОВ А. И. Влияние электролитно-плазменного азотирования на коэффициент трения поверхности титановых сплавов.....	56
ПАШКЕВИЧ В. М. Критерий моментов для оценки собираемых профилей сложных объектов.....	58
СВИРЕПА Д. М. Технология комплексной обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом внутренних цилиндрических поверхностей.....	60
СВИРЕПА Д. М. Технология магнитно-динамического накатывания с формированием антифрикционных покрытий.....	61
ТАРАДЕЙКО И. А. Устройство для триботехнических испытаний наружных поверхностей валов.....	62
ТАРАДЕЙКО М. В. Оценка влияния режимов обработки импульсно-ударным накатыванием при обеспечении микрорельефа поверхности.....	64
ФЕДОРЕНКО А. М. Совершенствование методики структурной оптимизации черновой токарной многопроходной обработки.....	65
ЮМАНОВА А. Н., РАБЫКО М. А., ШЕМЕНКОВ В. М., ДУДКИНА С. С. Влияние легирующих элементов на глубину и степень упрочнения сталей при обработке тлеющим разрядом.....	66
ЮМАНОВА А. Н., ШЕМЕНКОВ В. М. Иммитационное моделирование температурного баланса изделия, помещенного на катод, при обработке импульсным тлеющим разрядом.....	67

## **Секция 2. Машиноведение, детали машин и прикладная механика**

БАРАНОВ К. Н., ГУТЕВ А. П., ГРУША В. П. Применение вторичных силуминов с повышенным содержанием железа для подшипников скольжения.....	68
БЛАГОДАРНАЯ О. В., ПОНОМАРЕВА О. А. Разработка модели модульной кисти руки-манипулятора.....	70
ВИДЮШЕНКОВ С. А. Влияние количества опор на жесткостные характеристики элементов конструкций зеркала радиотелескопа.....	71

ВИДЮШЕНКОВ С. А., АСТАФЬЕВ И. М. О методе определения деформаций элементов металлоконструкций антенн радиотеле-скопов.....	73
ВЫСОЦКАЯ Н. А., ФРАНЦКЕВИЧ В. С. Расчет зависимости движения частицы в барабанном грануляторе.....	75
ГРИДЮШКО Д. В., ХОЛОД А. А. Расчет устойчивости шахтной вагонетки.....	77
ДАНЬКОВ А. М., ГОНЧАРОВ Ю. В. Об отличительных особенностях прорывных разработок последних лет в области механических передач.....	79
КАЛИНЦЕВ Ю. В., БРИЖЕВИЧ А. В. Оценка работоспособности натяжного устройства ленточного конвейера.....	81
КРИВОНОГОВА Е. Г., ГАЛЮЖИН Д. С., СТАНКЕВИЧ С. Д. Оценка надежности возможных рабочих соединений прецессионного мотор-редуктора.....	83
ЛУСТЕНКОВ М. Е. Определение основных геометрических параметров циклоидально-цевочных передач (схема К-Н-V).....	85
ЛУСТЕНКОВ М. Е. Усилитель момента на основе циклоидально-цевочной передачи.....	86
ЛУСТЕНКОВА Е. С., ЗЫЛЬ С. А. Исследование КПД циклоидально-цевочной передачи.....	87
ЛУСТЕНКОВА Е. С., МАШИН Ю. В., КОМАР В. Л., ЗЫЛЬ С. А. Исследование геометрических параметров центроидного циклоидально-цевочного зацепления.....	89
ПРУДНИКОВ А. П. Торцовое соединение для передачи вращающего момента.....	91
ПРУДНИКОВ А. П. Эксцентриковое соединение для передачи вращающего момента.....	92
ПУЗАНОВА О. В. Методика оценки эффективности программного управления рабочей машиной.....	93
РУДЕНКО С. П., САНДОМИРСКИЙ С. Г. Инженерный метод расчета зубчатых колес на глубинную контактную выносливость.....	95
ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ПОПОВ В. Б., ГАЛЮЖИН М. А., ПУСКОВА В. М. Методики компьютерного моделирования контактных поверхностей колес прецессионной передачи.....	97

### **Секция 3. Технологии получения новых материалов и покрытий**

АБОРКИН А. В., ПРУСОВ Е. С., БАБИН Д. М. Механические свойства заготовок из стружечных отходов литых металломатричных композитов.....	98
АНДРИЕНКО В. М., ДУВАЛОВ П. Ю., КАЛЕНТИОНОК А. И. Испытание на износостойкость закладных охлаждающих стержней из заэвтектического ИЧХ.....	100

АНДРИЕНКО В. М., ДУВАЛОВ П. Ю., ПУМПУР В. А. Изучение микроструктуры закладных охлаждающих стержней из заэвтектического ИЧХ.....	102
АНДРУХОВА О. В., САФРОНОВ И. С., УШАКОВ А. И. Физические процессы в поверхностном слое конденсированного материала при воздействии наносекундных лазерных импульсов.....	104
ВАЛЬКО А. Л., РУДЕНКО С. П., САНДОМИРСКИЙ С. Г. Обеспечение заданного распределения твердости цементуемых деталей.....	106
ГОВОР Т. А., РЕВА О. В. Исследование закономерностей скоростной электрокристаллизации защитных никелевых покрытий для деталей пожарной аварийно-спасательной техники.....	108
ГРЕБЕНЩИКОВА М. М., МИРОНОВ М. М., КОСТЫЛЕВ В. В. Получение биомедицинских материалов на основе нитридов титана и гафния плазменными технологиями.....	110
ДОГОТАРЬ Л. В., ПОДБОЛОТОВ К. Б. Синтез системы «карбид вольфрама – кобальт» при применении термохимических процессов....	112
ДУВАЛОВ П. Ю., АНДРИЕНКО В. М. Применение износостойких хромистых чугунов в строительной отрасли.....	114
КОРОЛЁВ А. Ю., СЕНЧЕНКО Г. М., ПАРШУТО А. Э. Потенциодинамические исследования черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах.....	115
ЛЕОНОВИЧ И. А., АДИНЦОВ Д. Д. Предел прочности при растяжении как функция плотности ABS-пластика, полученного наплавлением нитей.....	117
ЛИСОВАЯ И. А. Влияние ультрафиолетового воздействия на твердость изготовленных из фотополимера Grey V4 образцов.....	118
ЛОЗИКОВ И. А., ЙИН АН, ДОБРОВОЛЬСКИЙ А. Д. Электроконтактные материалы.....	119
ЛОЗИКОВ И. А., ЙИН АН, МАХНОВЕЦ Д. С. Технология получения материалов для разрывных контактов.....	121
ЛУЧЕНОК А. Р., СУДНИК Л. В., ВАНЬКОВИЧ А. С., ТКАЧУК В. С. Рециклинг отработанных мишеней для установок вакуумного распыления.....	123
ЛУЧКИНА Е. Е., СЛОБОЖАНИНОВА М. В., КАРАЕВА Ю. В. Оценка твердости эпоксидных покрытий с использованием жидких продуктов пиролиза древесины.....	125
НИСС В. С., ПАРШУТО А. Э., СОРОКА Е. В. Характеристики покрытий при высокочастотных режимах микродугового оксидирования.....	127
ОВЧИННИКОВ Е. В., МИХАЙЛОВ В. В., СВИСТУН А. Ч., ЛИННИК Д. А., ОВЧИННИКОВ А. Е. Теоретические аспекты формирования электроискровых покрытий.....	129
ПИЛИПЧУК А. П., КОНДРАШУК С. М., МИШИН А. А. Способ создания дискретных бронезащитных элементов.....	131

ПРЕДКО А. А., ОЛЕШУК И. Г., МОЙСЕЕНКО А. Н., ПОБОЛЬ И. Л., КАНАНОВИЧ Н. А. Ионно-плазменное азотирование алюминиевого сплава В95.....	133
СТАРОВОЙТОВ А. М., ГОЛОЗУБОВ А. Л., БЕРЕЗОВСКИЙ В. В. Нанесение тонкопленочных упрочняющих покрытий на посадочные поверхности сопрягаемых поверхностей.....	135
ТЕРЕЩУК О. И., КОМАРОВСКАЯ В. М. Планарные магнетроны со сверхвысоким коэффициентом использования материала мишени.....	136
ФЕДОСЕНКО А. С., АНДРЕЕВ И. К., БЕЛЯКОВИЧ В. А., СЕЛИВАНОВА Ю. В. Способ подготовки керамических порошков для газотермического напыления.....	138
ФЕДОСЕНКО А. С., ОЛЕНЦЕВИЧ А. С. Влияние параметров процесса механического легирования на характеристики силуминовых порошков.....	139
ФЕДОСЕНКО А. С., ОЛЕНЦЕВИЧ А. С., АНДРЕЕВ И. К. Влияние характеристик механически легированных порошков на свойства плазменных покрытий.....	140
ФИЛИППОВИЧ Л. Н., ЛЕМЕШОНОК С. Н., НЕСТЕРЕНКО П. В., ИГНАТОВИЧ Ж. В., РОГАЧЕВ А. А. Композиционные материалы на основе полилактида.....	141
ХАБИБУЛЛИН А. И. Технология модифицирования стали в индукционных печах.....	143
ХОЗРОМ И. М., ОШОРОВ А. Д., УШАКОВ И. В. Механические свойства композита на основе сплава 5БДСР при криогенных температурах.....	144
ЧЕКАН Н. М., ОВЧИННИКОВ Е. В., КОСТЮКОВИЧ Г. А., АКУЛА И. П., ЭЙСЫМОНТ Е. И. Физико-механические характеристики многофункциональных покрытий на основе металлических и углеродных матриц.....	146
ШЕЛЕГ В. К., ЛУЦКО Н. И., КАРДАПОЛОВА М. А. Микротвердость покрытия из никелевого сплава при лазерной наплавке с поперечным сканированием.....	148
ЭЙСЫМОНТ Е. И., ГРИГОРЬЕВА Т. Ф., ОВЧИННИКОВ Е. В. Композиционные механоактивированные полимерные материалы.....	150

#### **Секция 4. Сварка, родственные процессы и технологии**

БОЛОТОВ С. В., ЮМАНОВ Д. Н. Методика математического моделирования процесса контактной рельефной сварки нахлесточных и Т-образных соединений в среде ANSYS.....	152
ГЛУЩЕНКО В. В., ЛЯПИН А. И. Оценка теплообмена между положительным столбом сварочной дуги и образцом, внесенным в столб.....	153
ДЕВОЙНО О. Г., ПИЛИПЧУК А. П. Особенности напряженного состояния при лазерной поверхностной термообработке деталей.....	155

КОРОЛЁВ С. А. Проектирование сварной конструкции и разработка требований к технологии ее изготовления на основе оценки основных показателей свариваемости.....	157
КОРОТЕЕВ А. О., ФЕТИСОВА Е. А., ДОЛГАЯ В. Д. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке в условиях модификации защитной среды SF <sub>6</sub> .....	159
КРЮЧКОВ П. А., КОБЕРНИК Н. В., ГУРКИН С. В. Сварка корневого слоя шва кольцевых стыков труб магистральных газопроводов большого диаметра и влияние величины смещения кромок на качество формирования соединения.....	160
ЛУПАЧЁВ А. Г., КОРОТЕЕВ А. О. Сварка стабилизированных сталей, эксплуатирующихся при повышенных температурах.....	162
ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И., МИНЬКОВ А. Л., КОРОТЕЕВА А. А. Особенности сварки и эксплуатации трубопроводов из стали ASTM A335 Gr P91.....	164
ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И., ОКОВИТЫЙ В. А., ДЕВОЙНО О. Г., ЛИТВИНКО А. А. Оптимизация процесса плазменного напыления керамических покрытий.....	166
ПАРШИН С. Г., ГАО Ю., КОРОТЕЕВ А. О. Исследование сварочно-технологических свойств покрытых электродов с фторидно-перовскитным покрытием для подводной мокрой сварки.....	168
СИНИЦА А. Н., СИНИЦА М. А. Особенности проектирования каркаса блочных газорегуляторных пунктов методами трехмерного компьютерного моделирования.....	170
СОВЕТКИН Д. Э., КЛИМОВ А. С. Повышение тепловой эффективности сжатой дуги в аргоне с регулируемымыми прямоугольными импульсами тока.....	171
ФЕТИСОВА Е. А., КОРОТЕЕВА А. А., ДОЛГАЯ В. Д. Влияние гексафторида серы в составе защитной газовой среды на ширину валика наплавленного металла.....	174
ФЕТИСОВА Е. А., КОРОТЕЕВ А. О., КОРОТЕЕВА А. А., ДОЛГАЯ В. Д. Частота коротких замыканий при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой среды SF <sub>6</sub> .....	175
ФЕТИСОВА Е. А., ЛУПАЧЁВ А. Г., ЦЫГАНКОВ И. И. Особенности сварки легированных сталей со специальными свойствами.....	176
ФУРМАНОВ С. М., ЮМАНОВ Д. Н., СЕРГЕЙЧИК А. О. Использование тиристорного регулятора мощности для программирования режимов контактной сварки.....	178
ЧЕШКО М. Ю. О подтверждении соответствия оборудования для ручной лазерной сварки.....	179
ШУКАН Н. М., ЛИПКОВ В. В., ЛУПАЧЁВ А. Г., КОРОТЕЕВ А. О. Технология ремонта массивной фрезы из высоколегированного чугуна механизированной сваркой.....	180



ШУКАН Н. М., ЛОПАТИНА А. А., КУЛИКОВ В. П., КОРОТЕЕВ А. О. Аддитивная послойная наплавка элементов сложной геометрии из алюминиевых сплавов.....	181
ЮМАНОВ Д. Н., ФУРМАНОВ С. М., СЕРГЕЙЧИК А. О. Разработка блока программного управления пневмоприводом контактной сварочной машины.....	182
ЯКУБОВИЧ Д. И., СТРЕЛЬЦОВ С. В., ВАСЕНИЧЕВА А. В. Получение мелкодисперсного порошка методом точечного электроэрозионного диспергирования.....	184
ЯКУБОВИЧ Д. И., СТРЕЛЬЦОВ С. В., ВАСЕНИЧЕВА А. В. Получение порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования для шихты покрытых электродов ручной дуговой сварки.....	185
ЯКУБОВИЧ Д. И., ШАБЛОВСКИЙ А. В. Определение условий растворения карбида кремния в низкоуглеродистой стали при электродуговом плавлении неплавящимся электродом в медной изложнице.....	186
ЯКУБОВИЧ Д. И., ШАБЛОВСКИЙ А. В. Параметры электродугового процесса плавления карбида кремния со сталью в медной изложнице.....	187

### **Секция 5. Транспортные и технологические машины**

БЕРЕСНЕВ В. В. Учет сил сопротивления в шарнире рабочего элемента молотковой дробилки при соударении с частицей материала.....	188
ГЕРЦ Э. Ф., МЕХРЕНЦЕВ А. В., УРАЗОВА А. Ф. Обоснование параметров лесотранспортных систем для работы под пологом древостоя.....	190
ГРАЦ А. А., РОГОЖИН В. Д. Повышение эксплуатационной надежности гидросистемы БС-4000ПБА-2 (шасси МАЗ-5434Х3).....	192
ЖУРАВСКИЙ Р. А., КОВАЛЕНКО Н. А. Ручной гайковерт с усилителем.....	193
ЗАРОВЧАТСКАЯ Е. В., СИВАЧЕНКО Л. А., БУЗАУОВА Т. М. Вибрационная мельница непрерывного действия.....	194
КОВАЛЕНКО Н. А., КЛЕПЧА Е. П. Методика комплексной оценки эффективности работы установки для мойки автомобилей.....	196
КОВАЛЕНКО Н. А., ПАВЛЕНКОВА В. П. Формирование методики выбора типов рабочих постов в автотранспортной организации.....	198
КУЗНЕЦОВ Е. В. Применение подшипников качения в ДВС.....	199
КУЗЬМЕНКОВА М. С., СИВАЧЕНКО Л. А. Цепной агрегат для сортировки материалов.....	201
КУЛАБУХОВ А. В., СМОЛЯР А. П. К вопросу о расчете пассивного давления грунта на подпорную стенку.....	202
КУЛАБУХОВ А. В., СМОЛЯР А. П. Об оптимизации параметров режущих элементов землеройных машин.....	203
КУРОЧКИН Н. В. К возможности применения молотковых дробилок для измельчения абразивных материалов.....	204

ЛЕСКОВЕЦ И. В. Проблемы определения нагрузок в гусеничном движителе бульдозеров.....	206
ЛОБАХ В. П. Исследование разжимного устройства барабанного тормозного механизма.....	208
МЕЛЬНИКОВ А. А. Влияние упругости тормозного диска на усилие на тормозном цилиндре.....	210
МЕЛЬНИКОВ А. А. Особенности создания конечно-элементной сетки при тепловом моделировании тормозного диска.....	211
МЕЛЬНИКОВ А. С., МЕЛЬНИКОВ А. А. Корреляция параметров подвески с показателями тормозной динамики колесной машины.....	212
НАУМЕНКО А. Е. Особенности технического диагностирования грузоподъемных механизмов малой грузоподъемности.....	213
ПЕТРЕНКО М. Л., ВАГУРО В. И. Совершенствование алгоритма управления системой активной безопасности мотоцикла на основе анализа силовых факторов.....	215
ПЕТРЕНКО М. Л., РОГОЖИН В. Д., БОГАЧЕВ П. В. Исследование термически напряженных состояний ДВС с блоком цилиндров из алюминиевых сплавов.....	216
РОГОЖИН А. В. Совершенствование производственно-технической базы для автомобилей с гибридными силовыми агрегатами.....	218
РЫНКЕВИЧ С. А. Применение информационных технологий при мониторинге свойств автомобилей.....	219
САЗОНОВ И. С., ПОНОМАРЕВА О. А., БЛАГОДАРНАЯ О. В. Расчет частоты свободных колебаний кузова автомобиля.....	221
СЁМЧЕН В. И. Проблемы безопасного выполнения работ подъемно-транспортными машинами.....	222
ХАРИТОНОВ Ю. М., СИВАЧЕНКО Л. А. Волновой смеситель непрерывного действия.....	223
ШАРОЙКИНА Е. А. Воздействие сил на измельчаемую частицу материала в рессорно-стержневой мельнице.....	225
ЯСЮКОВИЧ Э. И. Моделирование мобильности грузовых беспилотных колесных машин.....	226

### **Секция 6. Строительство и техносферная безопасность**

АГЕЕВА Т. Н., ВАЛЬКО О. В., ЩУР А. В. Радиоэкологические аспекты использования продукции леса.....	227
АГЕЕВА Я. Д., ЛАПИДУС А. А. Планирование оптимального графика снабжения строительства в условиях стесненности на основе метода динамического программирования.....	229
БРАНОВИЦКИЙ А. М., ПАРАХНЕВИЧ В. Т. Технология очистки сточных вод автомобильных дорог.....	231
ГОЛУШКОВА О. В. Методы организации равноритмичного потока при определении продолжительности выполнения работ.....	233

ГОЛУШКОВА О. В., ГОЛУШКОВ А. М. Оценка значимости элементов транспортной инфраструктуры.....	235
ДАНИЛОВ С. В., СЕМЕНЕНКО Е. В. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами без обетонирования.....	236
КОЗУНОВА О. В., ДУДОРГА В. А. Исследование влияния толщины упругого слоя основания Винклера на параметры серийных дорожных плит однополосового покрытия.....	238
КОРБУТ Е. Е., МАРКО О. Ю., РАГУЛЕВА А. В. Изучение возможности и эффективности использования кирпичного лома в производстве бетонных изделий.....	240
КОТКОВ Р. В., МОРОЗ А. А., МОЛОДИН В. В. Конвейер для монтажа ограждающих конструкций высотных зданий.....	241
КУРНОСЕНКО Л. В., КАТКОВ В. А. Особенности зависимости величины приведенных затрат от продолжительности строительства объекта.....	243
ЛАТУН Т. С. Конструирование узла решетчатой системы.....	245
ЛАТУН Т. С., СИВУХА А. С., МАРЧЕНКО А. С. Изготовление стеновых изделий из гипса с применением строительных отходов.....	246
ЛОБИКОВА О. М. Совершенствование проектирования систем вентиляции.....	247
МАКАРЕНКОВ Д. А., СИВАЧЕНКО Л. А., СОТНИК Л. Л. Проблемы переработки компонентов литий-ионных аккумуляторов при ее утилизации.....	249
МАРЧЕНКО А. С., МИХАЛЬКОВ В. С. Получение кубовидного щебня.....	251
МАРЧЕНКО А. С., МИХАЛЬКОВ Д. В. Измельчение гранитного щебня на промышленной дробильной установке ДУК-1000.....	253
МЕЛЬЯНЦОВА И. И. К вопросу о нормировании модуля упругости легких бетонов.....	255
МИХАЛЬКОВ В. С., МИХАЛЬКОВ Д. В. Планирование многофакторного эксперимента по измельчению щебня на дробильных установках.....	257
МОИСЕЕНКО А. Б. Рециклинг строительных отходов.....	259
МОЛОДИН В. В., ВОЛКОВ Н. С., ПОПОВА М. С. Метод группового анализа дифференциальных уравнений как инновационный путь решения задачи зимнего бетонирования.....	261
НЕПОМНЯЩЕВ Г. А., МОЛОДИН В. В. Применение электрогидравлического эффекта в технологии устройства анкерных креплений к бетону.....	263
НИЖЕГОРОВОДА А. И., МОЛОДИН В. В. Экспериментальные исследования сцепления бетона восстановления с корродированным бетоном.....	265

НУЖДИН М. Л., ФЕЛЬДБУШ А. В. Усиление грунтового основания нагнетанием подвижного цементно-песчаного раствора в режиме гидроразрыва.....	266
ОРЛОВСКИЙ П. С. Влияние условий природной среды на безопасное функционирование предприятий нефтепродуктообеспечения.....	268
ПУСЕНКОВ А. Г. Исследование НДС системы «балочная плита – двухслойное основание с наклонным слоем» с учетом продольных деформаций в зоне контакта.....	270
САФАРОВ И. И., НУРИДДИНОВ Б. З., МИРЗАКАБИЛОВ Б. Н. Динамическое напряженно-деформированное состояние криволинейных участков тонкостенных подземных трубопроводов с протекающей жидкостью.....	272
СЕРГЕЕВА А. М. Особенности применения конструкций из алюминия в мостостроении.....	274
СЕРГЕЕВА А. М., ПОЛЯКОВА Т. А. К вопросу повышения безопасности автомобильных дорог.....	275
ХМЕЛЬНИЦКИЙ Е. С. Архитектурно-конструктивные особенности стропильных систем в традиционном деревянном жилом доме.....	277
ШИЛОВА И. В. Анализ эквивалентных доз ионизирующего излучения персонала кардиологического отделения.....	279
ШКИЛЬНЮК М. А. Влияние наличия мелкогабаритных конструктивных элементов в ограждающих стенах на их теплотехнические характеристики.....	280
ЩУР А. В., ДРАКИН Г. Н. Совершенствование качества воздушной среды внутри помещений.....	282
 <b>Секция 7. Контроль и диагностика промышленных объектов и окружающей среды</b>	
БАЕВ А. Р., АСАДЧАЯ М. В., ГИЛЬ Н. Н., ПАРАДИНЕЦ В. В. Оценка марки чугунов по данным структурного шума.....	284
БАЕВ А. Р., МАЙОРОВ А. Л., ВОРОБЕЙ М. В. Особенности ультразвукового контроля полых тонкостенных изделий.....	286
БОРИСОВ В. И., СЕРГЕЕВ С. С., ПРОКОПЕНКО Е. Н. Особенности поля излучения фазированной решетки типа шахматной доски при сдвиге фаз между элементами ПЭП.....	289
БУРАК В. А. Влияние размеров волноводов на параметры петли магнитного гистерезиса при импульсном перемагничивании.....	291
БУСЬКО В. Н. Исследование возможности разбраковки и оценки качества современных изделий из высокопрочного и серого чугуна магнитошумовым методом.....	293
ВОРОНОВ Е. Д., ТОЛКАЧЕВ Р. А., СЕРГЕЕВ С. С. Исследование влияния температуры объекта на результаты ультразвукового контроля TOFD-методом.....	295

ГОМЕЛЬКОВ К. А., ЛАППО И. А., ХОМЧЕНКО А. В. Разработка схемы установки и методики измерения интенсивности излучения, рассеянного в дисперсной среде.....	297
ГУСЕВ А. П., ЗАГОРСКИЙ И. Е. Магнитный дефектоскоп сталь- ных канатов.....	299
КУВШИННИКОВ В. С., КОВШОВ Е. Е., ДМИТРИЕВ Д. В., ДМИТРИЕВ В. Д. Имитационная модель гибкого детектора для про- мышленной радиографии.....	301
КУЛАГИН В. Н., БУРАК В. А., ОСИПОВ А. А. Внутренняя компенсация и выбор многопараметровой модели при использовании магнитного контроля.....	303
ПАНТЮШИНА В. Г., НОВИКОВ В. А. Анализ способов повы- шения достоверности магнитографической дефектоскопии.....	305
ПАНТЮШИНА В. Г., НОВИКОВ В. А. Формирование магни- тостатического поля в зоне остающейся подкладки при намагничивании стыкового соединения.....	306
ПОЗДНЯКОВА Е. В., ПОЗДНЯКОВ В. Ф. Исследование турбин- ного расходомера с волоконно-оптическими преобразователями.....	307
ПРОКОПЕНКО Е. Н., ПРОКОПЕНКО С. А., ПРУДНИКОВ А. Н. Применение нейронных сетей при технической диагностике.....	308
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Анализ структурной чувствительности магнитных параметров сталей, имеющих размерность напряженности магнитного поля.....	310
СОТСКАЯ Л. И., ПОНКРАТОВ Д. В., ШИЛОВ А. В. Прямо- угольный волновод с внутренним гофром как чувствительный элемент терагерцовых сенсоров.....	312
СОТСКАЯ Л. И., ЧУДАКОВ Е. А., СОТСКИЙ А. Б. Ограничения модели Друде при спектрофотометрии золотых пленок.....	314
СТАСЬКОВ Н. И., ОМЕЛЬЧЕНКО А. А., ПАРАШКОВ С. О. Оптические характеристики кристаллического кремния в области точек сенгулярности Ван Хова.....	316
ХОМЧЕНКО А. В., ПРИМАК И. У. Анализ термоупругих напря- жений в закаленном стекле на основе регистрации рассеянного света.....	318
ХОМЧЕНКО А. В., ПРИМАК И. У., ПИВОВАРОВА Е. В. Поляри- зационная интерферометрия пленок полимеризованных жидких кристаллов.....	320
ЧУДАКОВСКИЙ П. Я., МАНКЕВИЧ Н. С., КОРНЕЕВА И. А. Исследование поверхностных неоднородностей металлических нитей оптической дифрактометрией.....	321
ШАРАНДО В. И., ЧЕРНЫШЕВ А. В., ЗАГОРСКИЙ И. Е. Элект- ромагнитная толщинометрия никелевых слоев и покрытий.....	323
ШАРАНДО В. И., ЧЕРНЫШЕВ А. В., ПОЛОНЕВИЧ А. А. Магни- тодинамическая толщинометрия никелевых слоев и покрытий.....	325

ШУЛЬГА А. В., ШИЛОВА И. В. Внутррезонаторная лазерная сканирующая интерферометрия плоскопараллельных пластин.....	327
---	-----

### **Секция 8. Автоматизация, электропривод и электрооборудование**

БОЛОТОВ С. В., ТОЛПЫГО Н. А., КУШНЕР А. В. Разработка основного блока мобильного регистратора сварочных процессов.....	329
ЖЕСТКОВА Л. В. К вопросу энергосбережения в электроприводах центробежных установок.....	331
КОВАЛЬ А. С. Расчет циклового КПД безредукторных электроприводов пассажирских лифтов.....	333
КОВАЛЬЧУК В. М. Проблемы оценки допустимости фликера.....	334
ЛЕНЕВСКИЙ Г. С. Использование автоматизированных конденсаторных установок в системах электроснабжения предприятий.....	336
МИРОШ Д. В. Контроль межвитковых замыканий в обмотке асинхронного электродвигателя.....	337
ЧЕРНАЯ Л. Г., АБАБУРКО В. Н., САЗОНКО А. Е. Повышение безопасности систем управления взрывозащищенного электрооборудования.....	339
ЧЕРНАЯ Л. Г., САЗОНКО А. Е., КАЗАК Е. М. Обеспечение соответствия узлов взрывозащищенного оборудования требованиям технического регламента.....	341
ШНИП Д. В. Вопросы энергосбережения для технологических процессов подготовки жидких кормовых смесей.....	343
ШНИП Д. В. 3D-модель молочного такси с электроприводом.....	345

### **Секция 9. Информационные и интеллектуальные технологии, системы и средства**

АРСЕНЬЕВ Д. Г., МИСНИК А. Е., ШАЛУХОВА М. А. Применение технологий компьютерного зрения для выстраивания индивидуальных траекторий реабилитации.....	346
БОБРЯКОВ А. В., ПРОКОПЕНКО С. А. Использование информационных систем при работе производственно-сборочных предприятий.....	348
БОРЧИК Е. М., ДЕНИСЕВИЧ Д. А. Исследование чувствительности откликов алгоритмов решения оптимизационной задачи управления порядком выполнения заказов промышленного предприятия.....	350
ВЫГОВСКАЯ Н. В., ПАШКЕВИЧ М. В., МИЛЕВСКИЙ Р. В. Анализ алгоритмов для распознавания и сегментации медицинских изображений в нейронных сетях.....	352
ГАЛЮЖИН Д. С., КРИВОНОГОВА Е. Г., КОВАЛЕВ Д. А. Реверс-инжиниринг как один из этапов подготовки современного высокопрофессионального инженера.....	354

ЗАЙЧЕНКО Е. А., КАПЕЛЬКО Э. А. Применение множественного линейного регрессионного анализа данных для выявления взаимосвязи между пищевыми привычками и состоянием здоровья.....	355
КРУТОЛЕВИЧ С. К. Эвристический алгоритм построения маршрута обработки улиц реагентами.....	356
КРУТОЛЕВИЧ С. К., ПРУДНИКОВ В. М., БАРАБОЛЯ И. О. Виртуальная лабораторная работа по изучению RAID.....	358
КУТУЗОВ В. В., РЫНКЕВИЧ С. А. Алгоритмы бортовой системы автотранспортных средств на основе информационных технологий.....	359
КУШНЕР А. В., ЧЕРКАСОВА И. А. Использование проекта Wokwi для обучения студентов работе с микроконтроллерами.....	361
МАКАРОВ С. О., ТИХОНОВ А. Д. Современные технологии высокоточных координатных определений.....	363
МИСНИК А. Е., МИЩЕНКО И. И. Алгоритм работы нейронной сети для распознавания дефектов на рентгеновском снимке.....	365
ОПАРИН Е. В., ОПАРИНА Е. В. Моделирование атаки спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени.....	367
СТОЛЯРОВ Ю. Д. Проведение вычислений с числами с плавающей запятой с использованием виртуальных технологий.....	369
ЯКИМОВ А. И., ВЕРЕМЕЕВ А. Н. 1С – общая энергетическая шина данными управления ресурсами предприятия.....	371
ЯКИМОВ А. И., ТИМАШКОВА Л. А., САРСЫМБАЕВ Т. Р. Автоматизация продвижения инновационных проектов выпускающей кафедры университета.....	373
ЯКИМОВ А. И., ЯМЩИКОВ С. А., ШАМΠΑНОВ С. О. Компьютерная программа с демонстрацией разработанных игровых приложений.....	375
ЯСЮКОВИЧ Э. И. Проектирование информационно-аналитических процессов кибер-физических систем.....	377

### **Секция 10. Информационные технологии в промышленности**

БОНДАРЕВ А. Н. Правосторонняя регуляризация многоточечной краевой задачи для обобщенного матричного уравнения Ляпунова.....	379
ЕЛКИН А. И., РЯБКОВА В. В., АБОРКИН А. В. Моделирование влияния коэффициентов трения на кинематику мелющих тел в планетарной мельнице.....	381
ЗАМУРАЕВ В. Г. Существование оптимального пространства для задачи Дирихле для эллиптического уравнения.....	383
КАШПАР А. И. К задаче Валле-Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка.....	384
КЛЕВЦОВ С. И. Способ повышения точности микропроцессорных датчиков давления.....	386

ЛАПТИНСКИЙ В. Н. О структуре управлений линейных нестационарных систем.....	388
ЛАРЬКИНА Т. С. Математическое моделирование переходных процессов в асинхронном электродвигателе с применением относительных единиц в MAPLE.....	390
МАКОВЕЦКАЯ О. А. К анализу периодической краевой задачи для обобщения матричного уравнения Риккати.....	392
МАКОВЕЦКИЙ И. И. Об одном обобщении двухточечной краевой задачи для матричного уравнения Ляпунова.....	394
ПАРАШКОВ С. О., ТИМОЩЕНКО Е. В., ЮРЕВИЧ В. А. Математическая модель автоколебаний в балансной схеме вынужденного излучения в среде с резонансной нелинейностью.....	396
ПЕРЕВАРЮХА А. Ю., ПОГОДИНА А. В. Гибридная вычислительная структура модели двухкомпонентной социосистемы при инвазионном воздействии.....	398
ПРИМАК И. У., ХОМЧЕНКО А. В. К вопросу оптимизации внутрирезонаторного отражения излучения от призменного устройства связи.....	400
ПРИМАК И. У., ХОМЧЕНКО А. В. О моделировании термоупругих напряжений в стекле.....	401
РОГОЛЕВ Д. В. К периодической краевой задаче для системы матричных дифференциальных уравнений Риккати.....	402
РОМАНЕНКО А. А. К приближенному аналитическому решению задачи Фолкнера – Скэн.....	404
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Математическое моделирование безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала.....	406
 <b>Секция 11. Интеллектуальные технологии, системы и средства</b>	
АЛЕКСАНДРОВ А. В., АЛМАКАЕВ Д. А. Использование матрицы ADL для определения стратегии развития предприятия.....	408
АЛЕКСАНДРОВ А. В., АЛМАКАЕВ Д. А. Стратегический анализ портфеля бизнеса ОАО «Бабушкина крынка».....	409
АЛЕКСАНДРОВА С. А. Устойчивость бизнеса: понятие и компоненты.....	411
АЛЕКСАНДРОВА С. А., ЧУКОВА А. О. Система показателей работы логистического оператора в цепи поставок.....	412
БАРАНОВСКИЙ А. Г. Оценка эффективности мер стимулирования развития юго-востока Могилевской области.....	414
БАРАНОВСКИЙ А. Г. Потенциал региона и его развитие.....	416
БОРОДИЧ Т. А., ГУДЫНО О. Г. Совершенствование управления транспортными потоками на промышленном предприятии.....	418



ВИКТОРОВА Е. И., ДЕНИСОВ К. И. Анализ конкурентных сил в льняной отрасли и направления работы РУПТП «Оршанский льнокомбинат» .....	420
ВИКТОРОВА Е. И., ДЕНИСОВ К. И. Сравнительная оценка юзабилити сайтов-конкурентов РУПТП «Оршанский льнокомбинат».....	421
ГРИНЕВИЧ М. Н. Инструментарий оценки развития региональной транспортной системы.....	423
ГРИНЕВИЧ М. Н. Тенденции развития транспорта Могилевской области.....	424
ЖЕЛТОК Н. С. Инновации – путь к эффективному интенсивному экономическому развитию.....	425
ЖЕЛТОК Н. С., ЗВЕРЕВ М. А. Исследование активности кондитерских брендов в социальных медиа.....	426
ЖЕСТКОВА Е. С. Формирование частных критериев для оценки цифрового потенциала предприятия.....	427
ЗВЯГИНЦЕВА Ю. А., КУЗНЕЦОВА И. В. Особенности планирования денежных потоков сельскохозяйственной организации.....	429
ЗУБКОВ А. С. Проблемы бухгалтерского учета при использовании мобильных приложений банков.....	431
КАЗАНСКИЙ А. В. Тенденции изменения структуры финансирования дорожного хозяйства.....	433
КЛИМОВА Л. А., ХРЕБТОВИЧ К. В. ABC-анализ услуг Могилевгрузсервис.....	435
КЛИМОВА Л. А., ХРЕБТОВИЧ К. В. Стратегический анализ портфеля услуг предприятия.....	436
КОМАРОВА С. Л., САКОВИЧ М. Д. Исследование конкурентоспособности Белорусско-Российского университета.....	438
КОСТЮКЕВИЧ Е. А. Общество потребления как базис расширенного воспроизводства бизнес-структур.....	440
МАКАРЕВИЧ О. Д., МОХОВЦОВА А. Н. Планирование стратегического развития промышленного предприятия .....	442
МАКАРЕВИЧ О. Д., НИКОЛАЕНКО А. И. Модель информационно-аналитической среды для принятия эффективных кадровых решений.....	444
МАНОХИН А. А., МОРОЗОВ В. В. Создание современных литейных производств на основе применения выжигаемых 3D-моделей.....	446
НАРКЕВИЧ Л. В., ДЕМИДЕНКО В. О. Аналитическая поддержка управления сбытовой деятельностью предприятия.....	448
НАРКЕВИЧ Л. В., ЖУКОВА С. В. Методические аспекты построения информационно-аналитической системы ППР в сбытовой деятельности.....	450

НАРКЕВИЧ Л. В., СТЕПАНОВА В. В. Перспективный анализ поддержки управления оборотными средствами промышленных предприятий .....	452
НАРКЕВИЧ Л. В., СТЕПАНОВА В. В. Стохастическое моделирование в системе управления сбытом .....	454
НЕЧАЕВА Т. Г., БОРОДИЧ Т. А. Анализ и пути повышения эффективности использования основных средств предприятия.....	456
НЕЧАЕВА Т. Г., КОТОВА А. В. Факторы развития промышленного предприятия.....	458
ПИЧУГОВА О. А., МИХАЛЬЦОВА А. С. Исследование активности ОАО «Ольса» в социальных сетях.....	460
ПИЧУГОВА О. А., МИХАЛЬЦОВА А. С. Оценка сильных и слабых сторон продукции предприятия.....	462
ПУЗАНОВА Т. В., МАРЧЕНКО И. Р. Повышение эффективности производства на основе сокращения издержек.....	463
РОМАНЬКОВА Т. В. Контроль как основная функция управления транспортной системой.....	465
РОМАНЬКОВА Т. В. Методические подходы к оценке регулирования региональной транспортной системы.....	466
СИВАЧЕНКО Л. А., АБДУКАЛИКОВА Г. М., КУДАЙКУЛОВ М. К. Экономический потенциал технологического машиностроения.....	467
СИДОРКИНА О. А., СЛОБОЖАНИНОВА М. В., КАРАЕВА Ю. В. Возможность применения жидких продуктов пиролиза древесины в эпоксидных полимерах.....	469
СИНИЦА М. А., БАРАНОВСКАЯ К. П. Многомерный сравнительный анализ сайтов конкурентов ОАО «Бумажная фабрика «Спартак».....	471
СИНИЦА М. А., БАРАНОВСКАЯ К. П. Оценка конкурентоспособности сайта ОАО «Бумажная фабрика «Спартак».....	473
ТОКМЕНИНОВ К. А. Формирование качества промышленной продукции.....	474
ШАДРАКОВ А. В. Вклад промышленных предприятий в устойчивое развитие региона.....	476

**Секция 12. Проблемы и перспективы развития гуманитарной составляющей в вузах технико-технологического профиля**

БУДАЕВ М. Л., ГРИГОРЬЕВ М. Ф. Роль физической культуры в жизни молодежи.....	478
ДУБИНИНА А. П. Роль синергетической методологии в современном гуманитарном знании.....	479
КАЗАНСКИЙ А. В., КОРНЕЕВА Н. Е., ПРОТАСОВА Т. В. О реализации проекта «Нельзя забыть! Нельзя простить».....	481

КАНАШЕВИЧ Д. А., КАНАШЕВИЧ Н. М. Социокультурная образовательная среда как фактор конкурентоспособности технического вуза.....	483
КОВАЛЕНКО О. Е., МЕДВЕДСКАЯ Т. В. Организация самостоятельной работы по физике в техническом вузе.....	485
КОПЫЛОВА Е. А. Профессионально-прикладная физическая подготовка будущих инженеров по информационным технологиям.....	486
КУШНЕР В. В. Применение метода Пимслера при изучении немецкого языка.....	488
МАКАРЕНКО О. П., САМУЙЛОВ Д. Н. Ответственность студентов за свое физическое состояние и пути его формирования.....	489
МАЛЫШЕВА Е. А. Гуманитарная составляющая технического вуза.....	490
ПИСАРЕНКО В. Ф., МАКАРЕНКО О. П. Аспекты формирования здорового образа жизни студенческой молодежи.....	491
ПОПЕЛЬШКО Д. М. Курс «Основы российской государственности»: идеологическая составляющая и проблемы ее реализации.....	493
САВЧЕНКО Н. М. Обучение иностранному языку под руководством инфлюенсеров.....	495
САДОВСКАЯ Л. А. Физическая подготовленность студентов специальной медицинской группы.....	497
САМАРЦЕВ С. Б., КАМИНСКАЯ С. О., САМАРЦЕВ К. С. Дополнительное образование взрослых как приоритет социальной модели государства.....	499
СТАВСКИЙ В. Н. Особенности обучения второму иностранному языку студентов специальности «Зарубежное регионоведение».....	501
ТАПОРЧИКОВА М. В., ВАСЮХНЕВИЧ М. В. Влияние физической культуры на формирование личности студенческой молодежи.....	502
ТАПОРЧИКОВА М. В., ПЕРЕЦ Н. А. Выбор технического вуза с перспективами на будущее.....	503
ШАРАПАВА А. В. Выкарыстанне літаратурнага матэрыялу пры вывучэнні дысцыпліны «Беларуская мова (прафесійная лексіка)».....	505

УДК 537.876.42

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СОЛИТОНОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТЬЮ

Н. В. ГЕРАСИМЕНКО, Ф. М. ТРУХАЧЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Солитоны – это особые виды волн, которые обладают рядом особых физических свойств. Они могут распространяться на большие расстояния без потери формы и уменьшения амплитуды, взаимодействовать друг с другом без искажения формы. Скорость их распространения зависит от амплитуды. Солитоны были впервые обнаружены в 1834 г. на поверхности воды, но позже оказалось, что они существуют в разных областях физики, таких как плазма, оптика, астрофизика. Имеются публикации, описывающие применение солитонов в задачах неразрушающего контроля. Солитоны представляют большой интерес для науки и техники, т. к. они могут использоваться для передачи информации, моделирования нелинейных волновых явлений в различных физических системах и создания новых устройств.

Первые экспериментальные исследования солитонов, выполненные Расселом [1], проводились в специально подготовленных каналах, заполненных водой. В каналы опускались массивные плиты для создания локального избытка массы воды, из которого впоследствии формировался солитон. Для изучения свойств солитонов, например одностороннего переноса заряженных частиц в направлении распространения волны [2], эксперименты с жидкостью в каналах являются сложными для реализации в лабораторных условиях. Аналогичные явления наблюдаются в линиях электропередач (длинных линиях), локальное значение емкости в которых нелинейно зависит от напряжения. В таких системах солитоны – это локализованные импульсы напряжения, которые проходят вдоль линии без искажений. Нелинейность уравнивает дисперсию, вызванную линейными элементами линии, такими как резисторы, конденсаторы и индуктивности. Солитоны в линиях электропередачи также имеют множество потенциальных практических применений, таких как генерация гармоник, формирование импульсов, защита от воздействия грозовых разрядов в ЛЭП и др.

Рассмотрим произвольную длинную линию передачи с нелинейной межпроводной емкостью  $C(U)$ . Пренебрегая активными потерями, запишем систему телеграфных уравнений:

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = L \frac{\partial I}{\partial t}; \quad -\frac{\partial I}{\partial x} = C(U) \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $U(x,t)$  – волна напряжения в линии;  $I(x,t)$  – волна тока в линии;  $L$  – индуктивность единицы длины линии;  $C(U)$  – функция, описывающая нелинейную емкость единицы длины линии.

В [3] показано, что в длинных линиях с нелинейной емкостью существует солитонное решение КдФ-типа:

$$U(\xi, t) = U_m \operatorname{sech}^2\left(\frac{\xi - Vt}{D}\right), \quad (2)$$

где  $U_m$ ,  $D$  – показатели амплитуды и ширины солитона соответственно.

Взаимосвязь между напряжением и током в линии следует непосредственно из уравнений (1) и имеет вид

$$I = \int_0^U \sqrt{\frac{C(u)}{L}} du. \quad (3)$$

Вольт-фарадная характеристика нелинейной емкости (варактора или варикапа) достаточно точно описывается выражением

$$C(U) = C_0 \left(1 + \frac{U}{\varphi_k}\right)^{-1/2},$$

где  $\varphi_k$  – барьерный потенциал,  $\varphi_k \approx 0,4 \dots 0,9$  В.

Подставляя в выражение (3) и вычисляя интеграл, получаем

$$I(\xi, t) = \frac{4\varphi_k}{3Z} \left[ \left( 1 + \frac{U_m \operatorname{sech}^2\left(\frac{\xi - Vt}{D}\right)}{\varphi_k} \right)^{3/4} - 1 \right],$$

где  $Z$  – волновое сопротивление линии в невозмущенном состоянии,  $Z = \sqrt{L_0 / C_0}$ .

На рис. 1 показаны формы импульсов напряжения и тока при  $U_m = 0,5$ .

Основой для построения физической модели данного процесса является компьютерная модель, разработанная с помощью Multisim 11 (образовательная лицензия). В качестве нелинейной емкости использовались варакторы BV112 и линейные индуктивности. Линия возбуждалась прямоугольным импульсом от источника переменного напряжения прямоугольной формы (рис. 2 и 3).

Было установлено следующее. Ток в нелинейной линии электропередач не связан с напряжением простым соотношением  $I = U/Z$ , где  $Z$  – волновое сопротивление линии. При малых значениях амплитуды напряжения возбуждаемый солитоном ток в линии имеет такую же форму и полярность. Солитон меньшей амплитуды имеет большую ширину и распространяется вдоль линии с меньшей скоростью. Более детальный анализ свойств солитона тока в нелинейной линии без диссипации может быть выполнен в рамках модели Кортеве-

га – де Фриза, что является развитием существующей теории для солитонов напряжения и основой для будущих работ.

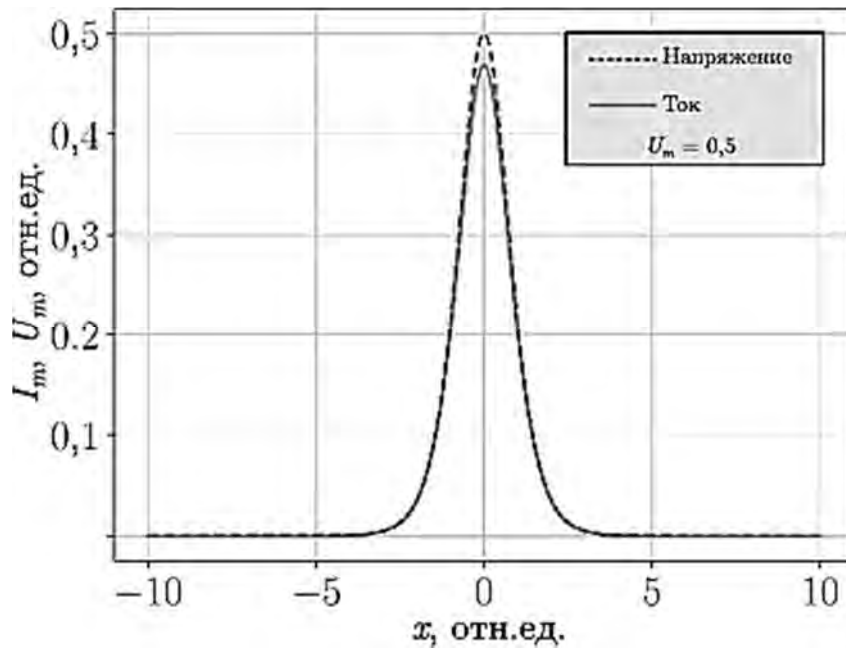


Рис. 1. Профили солитона тока и напряжения в линии электропередач с нелинейной емкостью

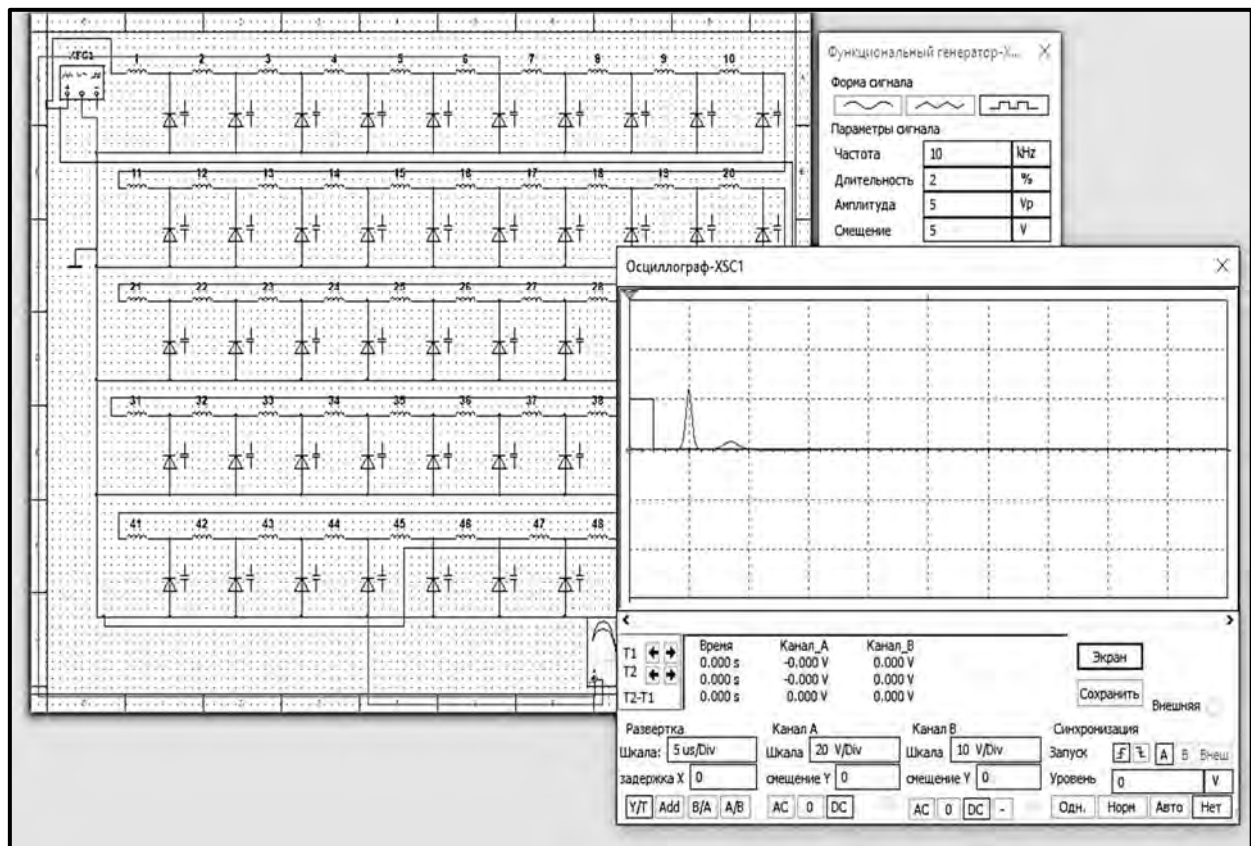


Рис. 2. Модель нелинейной линии электропередач в среде Multisim 11, осциллограмма сигнала на 6-м сегменте линии

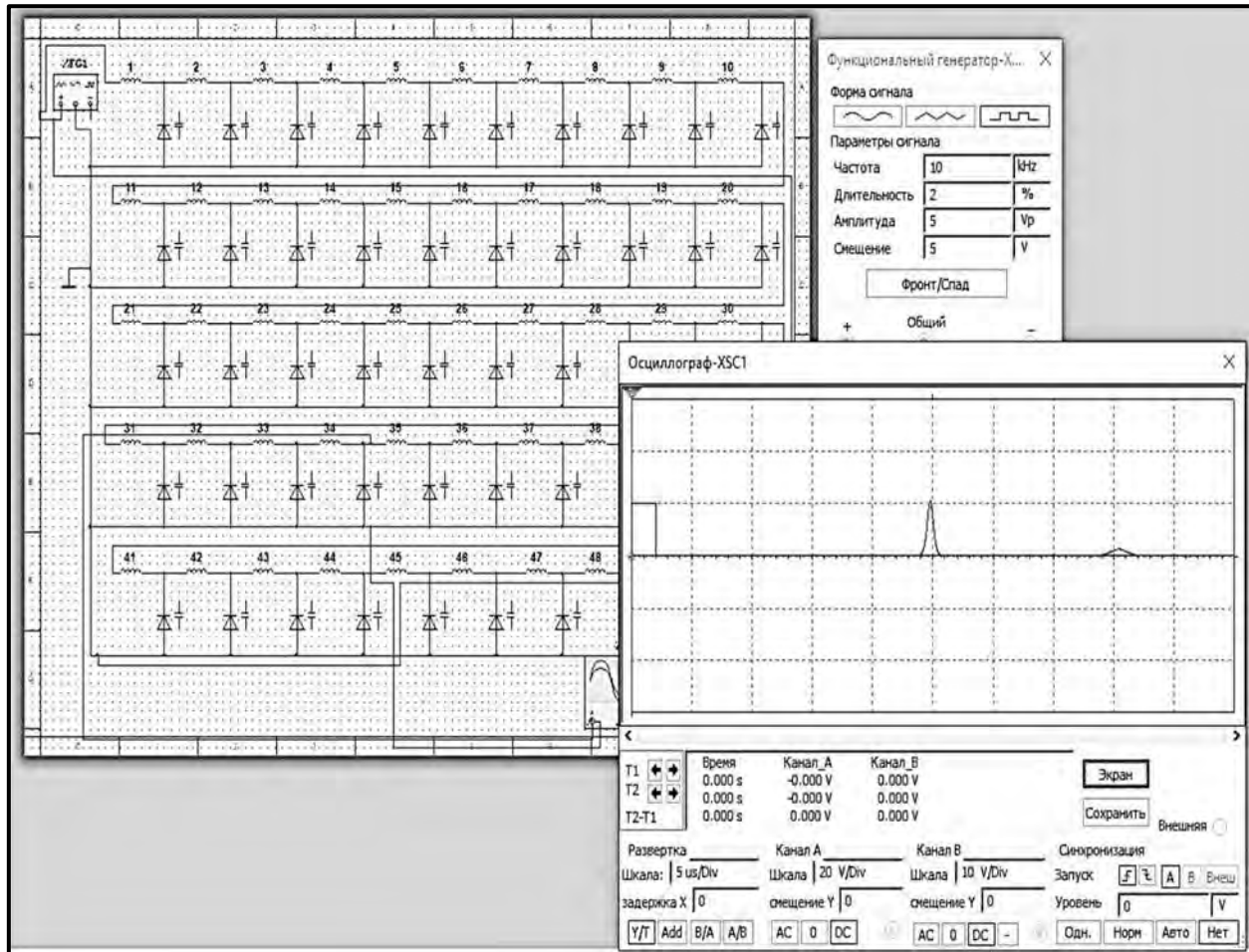


Рис. 3. Модель нелинейной линии электропередач в среде Multisim 11, осциллограмма сигнала на 34-м сегменте линии

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Russell, J. S.** Report on Waves, Published in the York 1844 / J. S. Russell // BA Reports. – 1844.
2. Unidirectional transport of ions and perturbation of plasma distribution functions by ion-acoustic solitons: Numerical simulation and analytical solution / F. M. Trukhachev [et al.] // Physics of Plasmas. – 2023. – Vol. 30.
3. **Ким, Д. Ч.** Видеосолитоны в дисперсной линии передачи с нелинейной емкостью р–п-перехода / Д. Ч. Ким // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83.

УДК 004.8

МЕТА-АССОЦИАТИВНЫЕ ГРАФЫ КАК ИНСТРУМЕНТ  
ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Е. МИСНИК

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Кибер-физические системы (КФС) представляют собой слияние физических процессов, вычислений и сетевых технологий. Такие системы характеризуются сложными структурами, динамичным изменением параметров и обширным взаимодействием компонентов, что требует эффективной стратегии управления для обеспечения их надежности и производительности. КФС характеризуются разнородной и интегрированной структурой, где физические и программные компоненты находятся в тесном взаимодействии. Управление такими системами сталкивается с многомерной сложностью, включающей анализ структурной динамики, многофункциональности и необходимости реагирования в реальном масштабе времени. Одна из ключевых задач – эффективная интеграция разнообразных подсистем и моделей данных, требующая унифицированного концептуального интерфейса, способного адаптироваться к эволюционирующим требованиям системы и условиям окружающей среды [1].

Онтология играет центральную роль в КФС, предоставляя структурированную базу для представления знаний. Она определяет сущности, их атрибуты и отношения между ними, предлагая семантическую основу для интеграции систем, взаимодействия данных и поддержки принятия решений. Однако статичный характер традиционных онтологий ограничивает их способность адаптироваться к динамике, присущей КФС. Этот недостаток требует подхода, который не только приспосабливается, но и предвосхищает изменения, позволяя быстро переконфигурировать онтологию.

Мета-ассоциативные графы расширяют возможности традиционных графовых онтологий, вводя дополнительный уровень абстракции и гибкости. Эта структура позволяет динамически ассоциировать и рекомбинировать компоненты онтологии, делая их особенно подходящими для адаптивных требований КФС. С использованием мета-ассоциативных графов онтологии могут быть быстро реструктурированы для отражения изменений в системе или её операционной среде, облегчая более отзывчивое и эффективное управление системой [1].

Мета-ассоциативные графы обобщают понятия вершины и метавершины до понятия узла метаграфа  $N$ , а также дополняют определение узла именем, множествами ассоциативных атрибутов и наборами событий и методов, принадлежащих узлу:

$$N = \{I, AS, EV, M\},$$



где  $I$  – имя узла;  $EV$  – множество событий, связанных с узлом метаграфа;  $M$  – множество методов, связанных с узлом метаграфа;  $AS$  – множество ассоциативных атрибутов, которые являются либо обычными атрибутами, либо ссылками на узлы метаграфа:

$$AS = \{A, N^*\}.$$

Данная разновидность метаграфа (рис. 1) позволяет повысить гибкость онтологического инжиниринга, в частности инжиниринга онтологий процессов сложной системы, поскольку ссылки на узлы метаграфа, по сути, мало чем отличаются от ребер метаграфа и позволяют обеспечить ассоциативные связи. Любая вершина потенциально становится метавершиной, т. к. ссылка на другой узел метаграфа предоставляет все возможности для взаимодействия с ним. С другой стороны, если нет необходимости в конкретный момент использовать ассоциативную связь, то ссылку можно воспринимать в виде обычного атрибута со значением, равным имени узла.

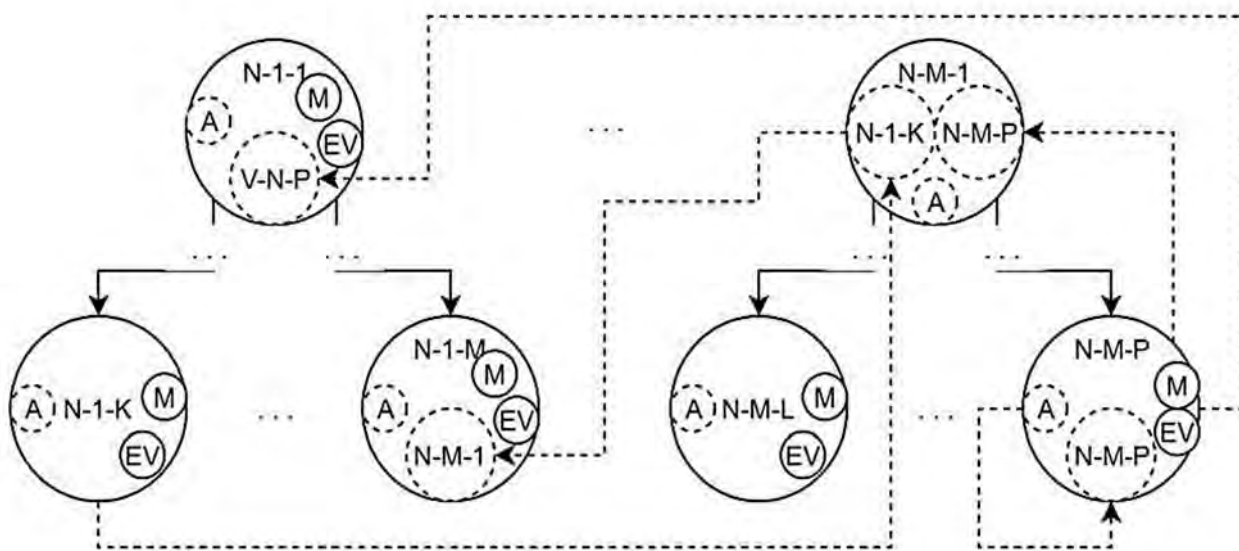


Рис. 1. Мета-ассоциативный граф

Мета-ассоциативные графы обеспечивают интеграцию процессного компонента в фундаментальную онтологическую модель системы. Данный подход предоставляет возможность гибкого и ресурсоэффективного проектирования процессных моделей на базе сегментированной структуры, т. е. подграфов, которые составляют единую онтологическую модель. Это предоставляет методологический инструментарий для адаптации и оптимизации системных процессов в соответствии с переменными требованиями и условиями эксплуатации кибер-физических систем [2].

В рамках онтологического инжиниринга комплексных кибер-физических систем объектно-ориентированный методологический подход организуется в трехуровневую архитектуру, включающую в себя:

– структурирование данных и знаний. Разработка онтологической структуры системы в виде иерархии классов. Здесь классы выступают как фундаментальные строительные блоки, определяющие структуру данных в контексте объектно-ориентированного подхода и служащие базисом для абстракции и категоризации компонентов системы;

– онтологическая организация данных. Концептуализация данных системы в соответствии с разработанной онтологической структурой. Этот процесс включает в себя присвоение конкретных данных и атрибутов экземплярам классов, тем самым реализуя объектно-ориентированную модель в контексте онтологии системы;

– формирование пользовательских интерфейсов. Разработка интерфейсов, способных отображать и манипулировать данными для поддержки и управления бизнес-процессами внутри сложных кибер-физических систем, а также предоставлять интерактивную среду для пользователей в контексте принятия управленческих решений.

Применение онтологического инжиниринга в разработке программно-инструментальных комплексов позволяет переосмыслить традиционную роль разработчиков программного обеспечения, трансформируя их деятельность в создание среды, основанной на онтологическом подходе (рис. 2). В этом контексте инструментарий такой среды обеспечивает прямой доступ к онтологическим сущностям, отражающим специфику предметной области, что позволяет экспертам, владеющим предметной экспертизой, осуществлять проектирование информационно-аналитических процессов независимо [3].

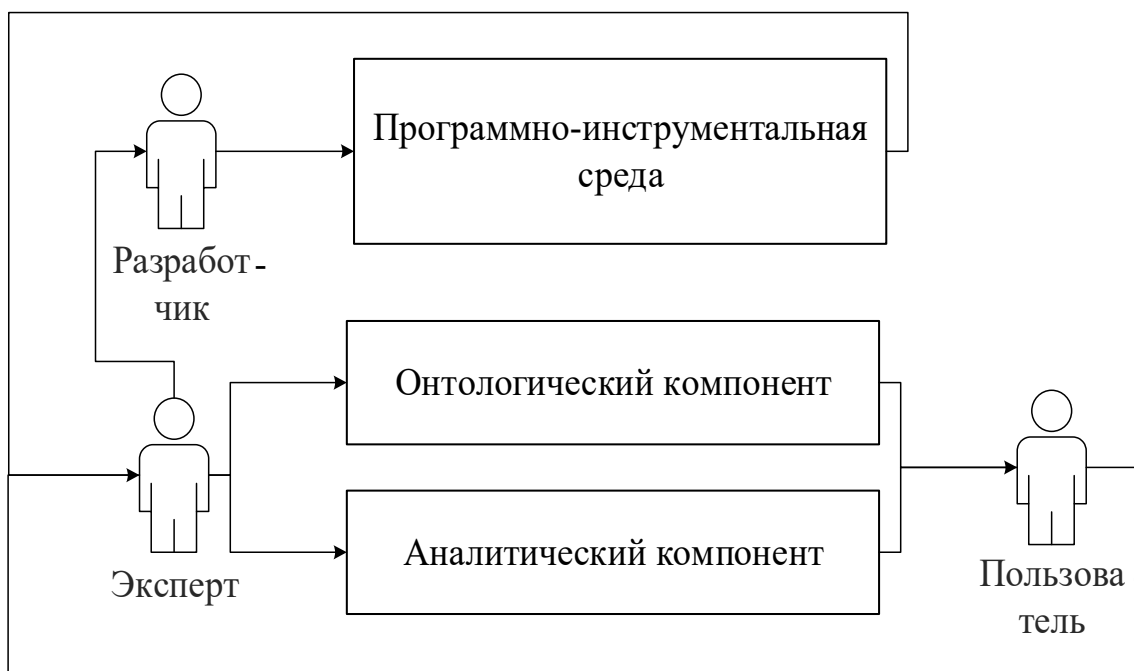


Рис. 2. Иллюстрация подхода к практической реализации программных средств в виде программно-инструментальной среды

Таким образом, специалисты обладают полномочиями для автономного конструирования и оптимизации процессов, что способствует ускорению разработки и повышению гибкости системных решений.

Данный подход сокращает разрыв между теоретическими онтологическими структурами и их практическим применением в КФС, обеспечивая более интуитивное и гибкое управление онтологиями. Преимущества этого метода включают улучшенную интеграцию системы, повышенную эффективность поиска информации и возможность коллаборативной обработки знаний. Кроме того, такой подход существенно снижает семантический разрыв между проектировщиком и участником процесса [4, 5].

Сотрудниками лаборатории кибер-физических систем Белорусско-Российского университета была разработана программно-инструментальная среда, функционирующая на вышеописанных принципах. В качестве свежего примера, реализованного с помощью программно-инструментальной среды, можно привести систему закрепления земельных участков г. Могилева, реализованную для Могилевского городского исполнительного комитета и Управления коммунальных предприятий г. Могилева.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Misnik, A. E.** Ontological Engineering on Metagraphs Basis / A. E. Misnik // VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – Moscow, 2022. – P. 1–6.
2. **Borisov, V. V.** Combined neural network modeling method for the operational management of complex systems / V. V. Borisov, A. E. Misnik // Information technologies. – 2012. – № 7. – С. 69–72.
3. Моделирование образовательных процессов на основе нейронечетких темпоральных сетей Петри / В. В. Борисов [и др.] // Прикладная информатика. – 2021. – Т. 16, № 4 (94). – С. 35–47.
4. Моделирование и проектирование информационно-аналитических производственных процессов на основе нейронечетких темпоральных сетей Петри / А. В. Бобряков [и др.] // Прикладная информатика. – 2022. – Т. 17, № 2 (98). – С. 65–78.
5. **Борисов, В. В.** Способ оперативного управления на основе комбинированного моделирования / В. В. Борисов, А. Е. Мисник // Научное обозрение. – 2014. – № 1. – С. 117–122.

УДК 621.787

## НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН СОВМЕЩЕННОЙ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

В. К. ШЕЛЕГ<sup>1</sup>, А. М. ДОВГАЛЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Мировой и отечественный опыт свидетельствует о том, что большинство современных машин выходят из строя по причине износа поверхностей их ответственных деталей. В развитых странах потеря средств, ежегодно направляемых на борьбу с износом и восстановлением работоспособности машин различного технологического назначения, составляет порядка 4 %...5 % национального дохода. В связи с этим повышение долговечности машин на основе повышения износостойкости поверхностей входящих в них ответственных деталей является важной народно-хозяйственной проблемой.

Как показывает анализ литературных источников, для повышения износостойкости поверхностей деталей машин создано достаточно большое количество динамических методов отделочно-упрочняющей обработки (вибро-накатывание, обработка дробью, центробежно-ударная, пневмоцентробежная, пневмовибродинамическая обработки и др.), осуществляемых на финишных операциях технологического процесса, каждый из которых имеет свои особенности и область технологического применения.

Вместе с тем известные динамические методы отделочно-упрочняющей обработки не предусматривают комплексного энергетического воздействия на упрочняемую поверхность с целью получения поверхностных наноструктур, определяющих существенное повышение износостойкости поверхностей деталей машин [1].

В связи с этим предложено детали пар трения изготавливать из обычных конструкционных углеродистых сталей, а повышение их производственного ресурса обеспечить на основе формирования упрочненного поверхностного слоя с мелкодисперсной субзеренной структурой наноразмерного диапазона методом совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (методом СМДО), обеспечивающим комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхность ферромагнитной детали.

Для реализации методов СМДО создан принципиально новый класс комбинированных инструментов применительно к отделочно-упрочняющей обработке внутренних, наружных и плоских поверхностей ферромагнитных деталей, разработаны конструкции их магнитных систем на основе применения существующих конфигураций постоянных магнитов, в том числе из редкоземельных материалов Nd Fe В.

На рис. 1 изображен комбинированный инструмент для СМДО внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитных деталей. В его состав входят следующие элементы: оправка 1; шайбы 2, 3; кольцевая камера 4; деформирующие шары 5; две независимые магнитные системы. Магнитная система, обеспечивающая упрочняющее воздействие на поверхностный слой ферромагнитной детали вращающимся магнитным полем, включает диски 6, 7 с аксиальными отверстиями 8, 9, цилиндрические постоянные магниты 10, 11 и магнитопроводы 12, 13 с цилиндрической или периодической наружной поверхностью. Магнитная система, предназначенная для сообщения радиальных колебательных движений деформирующим шарам 5, осуществляющим многократное импульсно-ударное деформирование элементарного участка упрочнений поверхности, содержит обоймы 14, 15 с аксиальными отверстиями 16, 17, цилиндрические постоянные магниты 18, 19, магнитопроводный диск 20 с периодической поверхностью 21 в виде синусоиды, выступов или зубьев. Оправка 1, шайбы 2, 3, диски 6, 7, обоймы 14, 15 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

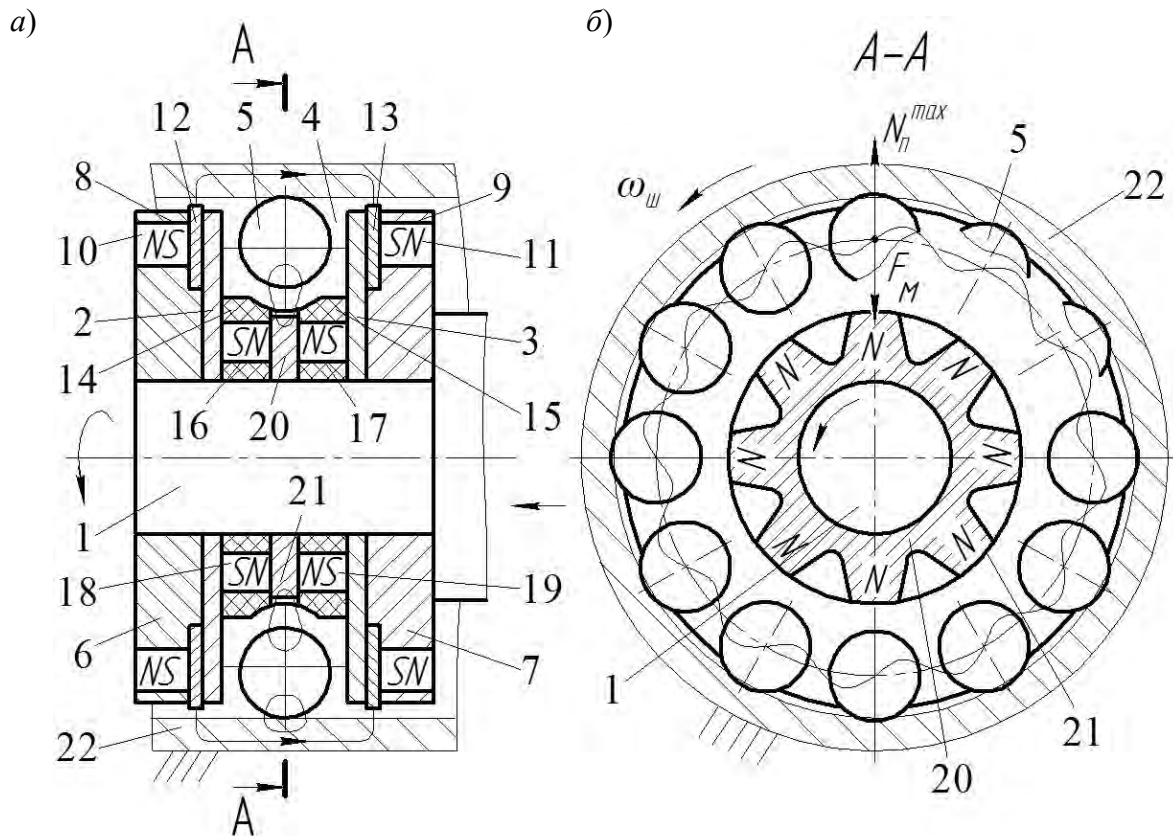


Рис. 1. Комбинированный инструмент для СМДО внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитных деталей: *а* – общий вид; *б* – поперечное сечение

Установлено, что в процессе совмещенной магнитно-динамической обработки деформирующие шары 5 вращаются относительно продольной от упрочняемой цилиндрической поверхности детали 22 с угловой скоростью 140...430 рад/с, осуществляют радиальные колебания с частотой 230...850 Гц

и амплитудой 1...5 мм, динамически воздействуют на упрочняемую поверхность силой 10...50 Н.

С учетом технической новизны предложенного метода СМДО были проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса совмещенной обработки.

Разработаны математические модели процесса СМДО внутренней и наружной цилиндрической поверхности ферромагнитных деталей. Получены дифференциальные уравнения, описывающие взаимосвязанные фазы движения деформирующих шаров в магнитном поле, позволившие установить закономерность движения деформирующих шаров, взаимосвязь их кинематических характеристик движения с конструктивными параметрами комбинированного инструмента и режимами процесса совмещенной обработки. Решение полученных дифференциальных уравнений движения деформирующих шаров в магнитном поле численными методами позволяет рассчитать требуемые параметры процесса совмещенной обработки для обеспечения заданных характеристик качества упрочняемых поверхностей ферромагнитных деталей.

Разработана динамическая модель комбинированного инструмента для СМДО поверхности отверстия ферромагнитной детали, позволяющая рассчитать величину жесткости магнитной связи деформирующего шара с магнитной системой инструмента при соответствующих параметрах процесса совмещенной обработки.

Разработана модель упругопластической деформации поверхности ферромагнитной детали гладким деформирующим шаром. Получены аналитические зависимости для расчета глубины внедрения деформирующего шара и глубины упрочненного поверхностного слоя, позволяющие прогнозировать параметры качества совмещенной обработки.

Разработана математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной обработке. Получено уравнение взаимосвязи параметров качества обработки с параметрами инструмента, режимами процесса совмещенного упрочнения и характеристиками упрочняемой детали. Получена аналитическая зависимость для расчета величины шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали, упрочненной методом СМДО.

Получены аналитические зависимости для расчета количества деформирующих шаров, диаметра и числа зубьев магнитопровода комбинированного инструмента.

Разработаны алгоритм и программа для расчета режимов процесса СМДО на ЭВМ с использованием дифференциальных уравнений, описывающих кинематику движения деформирующих шаров в магнитном поле.

Осуществлена оптимизация процесса СМДО при упрочнении стальных деталей. Получена зависимость шероховатости поверхности цилиндрического отверстия от основных параметров процесса СМДО.

Выполнены исследования характеристик качества поверхностного слоя ферромагнитных деталей, упрочненных СМДО.

Проведены рентгеноструктурные исследования упрочненных стальных и чугуновых образцов. Установлено, что метод СМДО в упрочненном поверхностном слое детали обеспечивает: увеличение плотности дислокаций; увеличение значения периода кристаллической решетки; создание в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия (сталь 45 – от минус 868 до 1162 МПа; серый чугун СЧ20 – от минус 846 до 942 МПа); формирование мелкодисперсной субзеренной структуры наноразмерного диапазона (сталь 45 – 20...25 нм; серый чугун СЧ20 – 18...20 нм) [2].

Выполнены исследования микроструктуры упрочненных образцов из стали и серого чугуна. Установлено, что метод СМДО обеспечивает: формирование мелкодисперсной субзеренной структуры наноразмерного диапазона (сталь 45 – 15...100 нм; серый чугун СЧ20 – 20...100 нм) на глубину 1,5...3,0 мкм (сталь 45) и 1,8...3,0 мкм (серый чугун СЧ20); увеличение глубины упрочненного слоя по отношению к импульсно-ударному деформированию, когда магнитное упрочняющее воздействие на поверхность ферромагнитной детали отсутствует, в 1,6–2,5 раза (сталь 45) и в 2,0–3,1 раза (серый чугун СЧ20) [2].

Предложен механизм формирования в поверхностном слое ферромагнитных деталей мелкодисперсной субзеренной структуры при упрочнении СМДО, учитывающий комплексное магнитно-силовое воздействие, многократное импульсно-ударное деформирование элементарного участка поверхностного слоя, вызывающее разрушение зерен и фрагментов зерен и их периодический поворот после очередного дробления на угол рассогласования векторов собственного и внешнего магнитных полей, позволяющий описать процесс получения наноструктурированного поверхностного слоя. Определена роль вращающегося магнитного поля и импульсно-ударного деформирования на процесс наноструктурирования поверхностного слоя ферромагнитных деталей.

Выполнены исследования триботехнических свойств поверхностей упрочненных ферромагнитных деталей. Установлено, что метод СМДО обеспечивает снижение коэффициента трения скольжения упрочненных поверхностей и повышение износостойкости ферромагнитных деталей в 2,3 раза (по отношению к поверхности, упрочненной импульсно-ударным деформированием).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Григорьев, С. Н.** Технологии нанобработки: учебное пособие / С. Н. Григорьев, А. А. Грибков, С. В. Алешин. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 320 с.
2. **Шелег, В. К.** Получение поверхностных наноструктур и антифрикционных металлических покрытий совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Инновационные технологии в машиностроении: сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоцкого гос. ун-та имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. – Новополоцк, 2023. – С. 150–152.

УДК 621.735.34

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МАССЫ ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ

В. Е. АНТОНЮК, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Н. П. ТИМОШЕНКО  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

В ближайшие годы на Белорусском автомобильном заводе будет создан автоматизированный комплекс производства кольцевых заготовок, который станет самым современным по уровню автоматизации и параметрам кольцевых заготовок в Европе [1]. Предусмотрено изготовление кольцевых заготовок из сталей разных марок с номенклатурой более ста наименований. Анализ методов получения заготовок показал, что необходима не только закупка оборудования, но и разработка технологии для задач создаваемого комплекса [2].

В докладе представлена постановка и поиск пути решения одной из задач технологического обеспечения работы комплекса – обеспечения точности заготовки в условиях нестабильности основных процедур кольцераскатки.

В автоматизированной линии кольцераскатки при изготовлении кольцевых заготовок используют операции их резки, нагрева, подачи на пресс, осадки, наметки и прошивки отверстия, кольцераскатки [3]. При проектировании технологических процессов кольцераскатки известные методы расчета параметров исходной заготовки используют следующие предпосылки:

- расчет массы окончательной кольцевой заготовки проводят по номинальным размерам без учета заданных допусков после кольцераскатки;
- масса заготовки после пресса и после кольцераскатки при однократном нагреве принимается неизменной;
- в массу исходной заготовки включают массу выдры и потери на окалину.

В итоге масса исходной заготовки  $m_{из}$  по номинальным параметрам является суммой массы окончательной кольцевой заготовки  $m_{кз}$ , массы выдры  $m_{выд}$  и массы потерь на окалину  $m_{ок}$ :

$$m_{из} = m_{кз} + m_{выд} + m_{ок} . \quad (1)$$

По зависимости (1) рассчитывается масса исходной заготовки, которая отрезается на первой операции резки в автоматизированной линии кольцераскатки и эту массу вводят в систему управления линии. В систему управления линии вводят и допуски на заданные параметры массы.

Масса кольцевой заготовки после пресса будет массой окончательной кольцевой заготовки после кольцераскатки. С учетом допусков на вес отрезаемой заготовки, выдры и потерь на окалину максимальная и минимальная массы окончательной кольцевой заготовки будут следующие:

$$m_{кз \max} = m_{из \max} - m_{выд \min} - m_{ок \min} ; \quad (2)$$

$$m_{кз \min} = m_{из \min} - m_{выд \max} - m_{ок \max} . \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) можем определить минимальные и максимальные размеры окончательной кольцевой заготовки с прямоугольным сечением:



$$m_{кз} = q \cdot \pi \cdot H \cdot (R^2 - r^2), \quad (4)$$

где  $q$  – удельная плотность материала кольцевой заготовки;  $H$  – высота заготовки;  $R$  – наружный радиус;  $r$  – радиус внутреннего отверстия кольцевой заготовки.

Если взять за основу номинальные допуски, то для изготовления окончательных кольцевых заготовок с максимальными и минимальными допускаемыми параметрами потребуется масса, приведенная в табл. 1.

Табл. 1. Масса кольцевой заготовки массой 115,7 кг при ее максимальных и минимальных допускаемых размерах

Исходный параметр по ТЗ	Значение номинальное	Значение максимальное	Значение минимальное
Наружный диаметр кольцевой заготовки, мм	923 ± 2,8	925,8	920,2
Внутренний диаметр кольцевой заготовки, мм	805 ± 2,8	802,2	807,8
Высота кольцевой заготовки, мм	92 ± 1,1	93,1	90,9
Масса кольцевой заготовки, кг	115,7	122,0	108,9

В табл. 2 приведены результаты расчета ужесточения допусков для окончательно изготовленной заготовки массой от 113,7 до 118,9 кг.

Табл. 2. Допускаемая точность изготовления кольцевой заготовки массой 115,7 кг при максимальных и минимальных значениях массы по принятому технологическому процессу

Исходный параметр по ТЗ	Значение номинальное	Значение максимальное	Значение минимальное
Наружный диаметр кольцевой заготовки, мм	923 ± 1,1	924,1	921,9
Внутренний диаметр кольцевой заготовки, мм	805 ± 1,1	803,9	806,1
Высота кольцевой заготовки, мм	92 ± 0,8	92,8	91,2
Масса кольцевой заготовки, кг	115,7	118,8	112,5

Получено, что для изготовления кольцевых заготовок с номинальными значениями размеров и массы требуется выполнить кольцераскатку с достижением точности между IT 12 и IT 13.

Выполненные расчеты позволяют более точно прогнозировать достигаемую точность заготовки при изготовлении на кольцераскатной линии.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОАО «БЕЛАЗ» построит современный комплекс кольцераскатки в Орше [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vitvesti.by/economy/belaz-postroit-v-orshe-sovremennyi-koltceraskatnyi-kompleks.html/>. – Дата доступа: 02.02.2024.
2. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 2 (55). – С. 43–54.
3. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 245 с.

УДК 621.7

## ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ КОЛЬЦЕРАСКАТКЕ

В. Е. АНТОНЮК<sup>1</sup>, С. Г. САНДОМИРСКИЙ<sup>1</sup>, В. В. ЯВОРСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»

Жодино, Беларусь

Кольцевые заготовки широко используют в машиностроении. Кроме высоких требований к точности размеров, структуре и механическим свойствам материалов, важно их изготовление без остаточных напряжений и высокой стабильностью формы. Кольцераскатка происходит в диапазоне температур от 1200 °С до 950 °С. Ее особенностью является небольшая локальная зона деформирования кольца осевыми и радиальными валками [1]. Остальная зона кольца при кольцераскатке находится в свободном состоянии. Поэтому образуется овальность кольца (рис. 1, *а*) вследствие разных протяженностей  $l_1$  и  $l_2$  контакта (рис. 1, *б*) заготовки с главным и дорновым валками. Особенности кольцераскатки приводят и к возникновению напряжений в кольце.

*а)*



*б)*

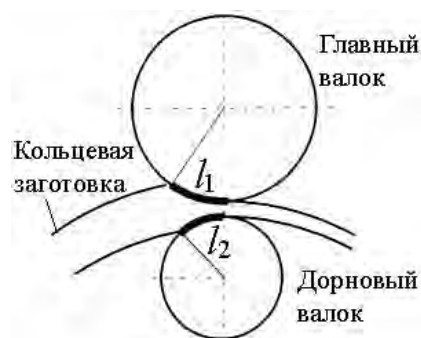


Рис. 1. Образование овальности кольца при кольцераскатке: *а* – искажение маложесткого кольца; *б* – зоны контакта кольца в процессе кольцераскатки

После кольцераскатки горячее кольцо имеет размеры, отличающиеся от размеров холодного кольца на 1,2 %...1,5 %. Температура поверхности кольца – около 950 °С, внутри кольца – около 1000 °С, у нижнего торца – около 680 °С. При таком перепаде температур на горячем кольце после кольцераскатки возникают остаточные напряжения. При охлаждении и температурной усадке остаточные напряжения в кольце возрастают. В зависимости от марки стали и условий охлаждения напряжения могут сопровождаться появлением поверхностных и внутренних трещин в изделии. Как правило, заготовки для ответственных изделий подвергают контролю поверхностных и внутренних дефектов. Но этот контроль не гарантирует стабильности геометрических и эксплуатационных параметров изделий: остаточные напряжения в процессе эксплуатации

релаксируют, что приводит к деформации изделий. Поэтому важным условием изготовления кольцевых заготовок для ответственных изделий, наряду с контролем отсутствия дефектов, являются операции стабилизации и снижения до минимума остаточных напряжений в заготовке.

Для этого предложено [2] использовать методику динамической стабилизации [3] кольцевой заготовки при ее охлаждении. Задача изобретения [2] в стабилизации формы (исключения эллипсности) и размеров колец с отношением внутреннего диаметра к наружному диаметру от 0,84 до 0,90 и отношением высоты кольца к наружному диаметру от 0,03 до 0,12.

В данном способе силовые элементы располагают симметрично относительно оси изделия (рис. 2, а), приводят их в соприкосновение с его внутренней поверхностью, вращают изделие или силовые элементы и обеспечивают разжимное силовое воздействие  $W$  силовых элементов на участки внутренней поверхности изделия, плавно увеличивая его от нуля и плавно снижая до нуля (рис. 2, б, участки А и С), создавая цикл нагружения, повторяют цикл нагружения 80–120 раз, из которых 20–60 циклов нагружения (рис. 2, б, участок В) осуществляют с максимальным силовым воздействием, создающим в материале изделия напряжение при растяжении от 0,90 до 0,95 предела текучести материала изделия.

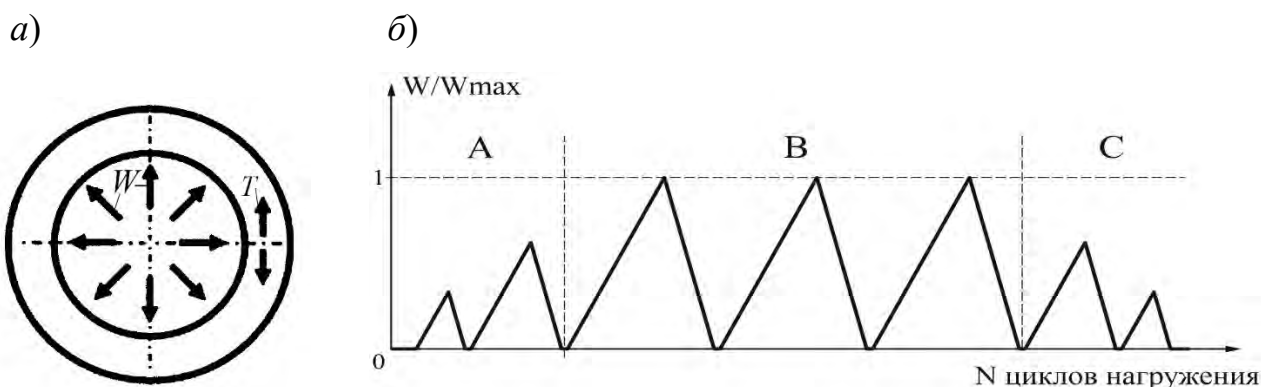


Рис. 2. Схема приложения (а) и изменения (б) к изделию разжимного силового воздействия  $W$ , вызывающего в изделии растягивающие усилия  $T$

Стабилизацию формы и размеров изделия обеспечивают созданием в нем механических напряжений, при циклическом изменении которых происходит снижение остаточных напряжений до минимального уровня.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольцеракатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 188 с.
2. Способ стабилизации формы и размеров маложесткого осесимметричного изделия: пат. ВУ 23995 / В. Е. Антонюк, В. В. Рудый, В. В. Яворский, С. Г. Сандомирский. – Оpubл. 30.04.2023.
3. Антонюк, В. Е. Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцеракатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 3 (52). – С. 28–35.

УДК 621.7.011

## АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОКОВКИ ДЕТАЛИ «ПОРШЕНЬ»

А. А. ГНЕВАШЕВ, П. А. ПЕТРОВ, И. А. БУРЛАКОВ

Московский политехнический университет

Москва, Россия

Поршень, являющийся основной подвижной деталью поршневых машин (паровых машин, насосов, компрессоров, поршневых двигателей внутреннего сгорания и дизельных двигателей), конструктивно, имеет три функциональные части: днище, уплотняющая часть (головка поршня) и направляющая часть (юбка поршня), каждая из которых выполняет свою функцию и характеризуется своим набором параметров. Функциональное назначение каждой части: днище совместно с головкой воспринимает газовые силы и тепловую нагрузку, передает тепло от поршня к цилиндру; юбка поршня передает боковую силу на стенку цилиндра и поддерживает положение поршня в конструкции.

Для обеспечения нормальной работы поршень изготавливают из различных конструкционных материалов, в том числе из литейных либо деформируемых алюминиевых сплавов следующих марок: АЛ30, АК6, АК12Д, АК18 и др. Известны несколько технологий обработки давлением, применяемых для изготовления поковки детали «Поршень» под последующую механическую обработку: технология горячей объемной штамповки и технология горячей изотермической штамповки. Последняя технология является наиболее перспективной в случае производства малых серий, обеспечивает хорошую проработку структуры деформируемого материала, сложность геометрии штампуемого изделия, а также более высокий коэффициент использования металла (КИМ).

Цель работы: разработка компьютерной модели технологической операции обратного выдавливания поковки детали «Поршень», выполняемой в условиях близких к изотермическим за один рабочий ход пресса и позволяющей выполнить анализ течения металла в очаге деформации, а также оценить параметры напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрены несколько возможных схем выполнения технологической операции: обратное выдавливание без подпора металла (рис. 1, *а*); обратное выдавливание с подпором металла (рис. 1, *б*, *в*). Компьютерная модель операции, разработанная в программном комплексе QForm [1], учитывает, что: деформируемый материал – алюминиевый сплав АК12Д; температуры исходной заготовки, штампа и окружающей среды равны 470 °С; температура штампа и окружающей штамп среды поддерживается постоянной и равной 470 °С, а температура деформируемого металла изменяется за счет теплового эффекта пластической деформации (см. рис. 1, *а–в*); деформирование выполняется на гидравлическом прессе со скоростью 2 мм/с. Варьируемым параметром является тип постановки задачи в программе QForm: 3D с двумя плоскостями симметрии (см. рис. 1, *а*, *б*); 3D без плоскостей симметрии (см. рис. 1, *в*).

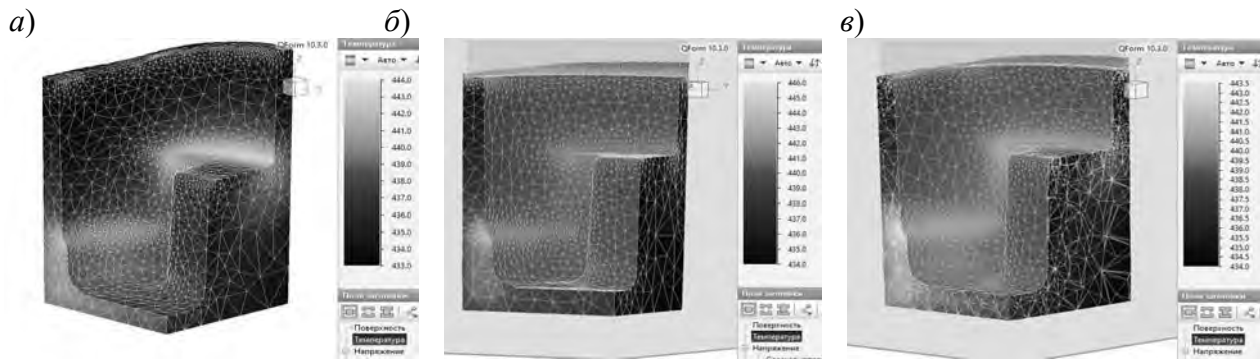


Рис. 1. Результаты моделирования технологической операции в QForm: *а* – обратное выдавливание без подпора металла (3D с двумя плоскостями симметрии); *б* – обратное выдавливание с подпором металла (3D с двумя плоскостями симметрии); *в* – обратное выдавливание с подпором металла (3D без плоскостей симметрии)

На рис. 2 показан пример расчета параметров напряженно-деформированного состояния – значений интенсивности напряжения и сопротивления деформации в очаге деформации в конце рабочего хода штампового инструмента.

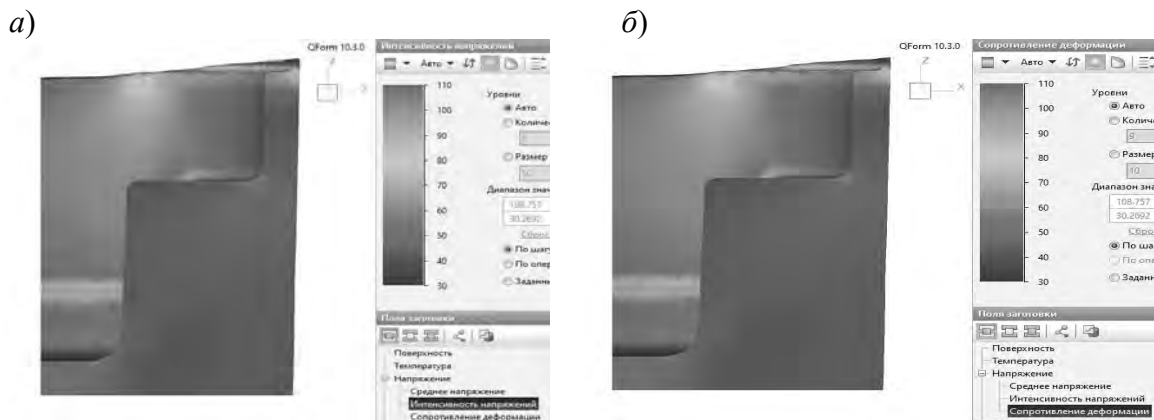


Рис. 2. Пример расчета параметров НДС: *а* – интенсивность напряжения; *б* – сопротивление деформации

Таким образом, выполненные расчеты и сравнительная оценка компьютерных моделей с результатами натуральных экспериментов показывают, что разработанная модель операции (см. рис. 1, *в*) наилучшим образом соответствует результатам опыта. Её применение возможно для анализа течения металла, а также определения энергосиловых параметров и выбора рационального режима технологической операции.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / А. В. Власов [и др.]; под ред. А. В. Власова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 383 с.

УДК 621.778.04:621.9.047.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБЧАТЫХ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

ДАЙ ВЭНЬЦИ<sup>1</sup>, А. Ю. КОРОЛЁВ<sup>2</sup>, Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Инновационный международный центр  
научно-образовательного и коммерческого сотрудничества «Дело»

<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Беларусь

Концентраторы-волноводы, в том числе ступенчатые концентраторы-волноводы трубчатого типа (СКВТТ), для разрушения тромбов в кровеносных сосудах изготавливаются из коррозионно-стойкой аустенитной стали 12Х18Н9 [1]. Данная сталь достаточно хорошо поддается обработке давлением. Повышение пластичности этой стали добиваются закалкой при температуре 1150 °С в воду. При нагреве происходит растворение карбидов хрома в аустените. Выделение их из аустенита при закалке исключено, т. к. скорость охлаждения велика. Никель обеспечивает хорошую пластичность стали.

Для формирования ступенчатых поверхностей СКВТТ выбран процесс безоправочного волочения трубки при комнатной температуре. Проверка маршрута волочения (пять проходов с шагом 0,1 мм тонкостенной (0,25 мм) трубки малого диаметра (1,5 мм) с целью формообразования ступенчатых поверхностей СКВТТ диаметрами 1,3 и 1,0 мм с точностью геометрических размеров рабочих поверхностей по 7-му качеству и с одновременным упрочнением материала) выполнялась по коэффициенту запаса прочности, а напряжение на выходе из волоки – по формуле Е. Зибеля. Трубку предварительно закаляли при температуре 1150 °С в воду.

Зависимости, характеризующие влияние расчетных и экспериментальных значений усилия волочения от характеристик деформации (относительного обжатия  $\varepsilon$  и коэффициента вытяжки  $\mu$ ), представлены на рис. 1, а, б.

При увеличении  $\varepsilon$  с 0,08 до 0,21 происходит повышение усилия волочения в 1,5 раза, а коэффициент запаса прочности снижается с 1,7 до критического значения 1,0. Таким образом, следует остановиться на более мягких режимах волочения с  $\varepsilon$  до 0,12 и с  $\mu$  до 1,13. Полученные экспериментальные значения усилия волочения хорошо согласуются с расчетными. Микротвердость стали увеличивается с 234 МПа (исходное состояние) до 300 МПа при  $\varepsilon \sim 0,10$  и  $\mu \sim 1,10$  и до 340 МПа при  $\varepsilon \sim 0,20$  и  $\mu \sim 1,25$  (рис. 1, в, г).

Способность стали к деформационному упрочнению определяется экспериментально при испытаниях на растяжение. Исходный предел прочности составляет 597 МПа, а после волочения его среднее значение – 800 МПа. Таким образом, степень упрочнения материала в среднем составляет 1,35.

Микроструктура исходного образца представляет собой, преимущественно, равноосный аустенит в виде зерен, имеющих правильные полигональные

границы с отсутствием двойников с размерами зерна 10...15 мкм (рис. 2, а). Холодная деформация характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла.

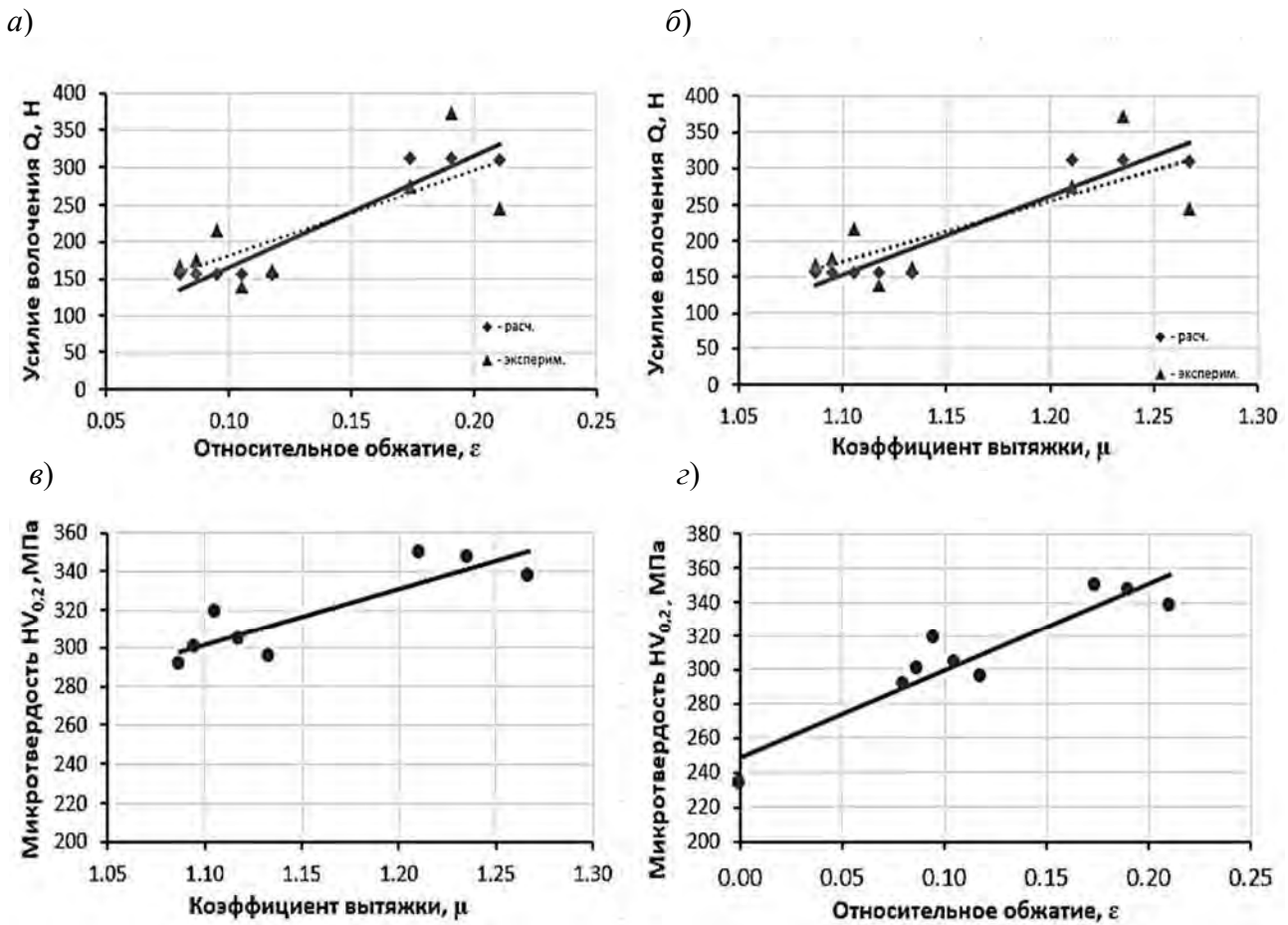
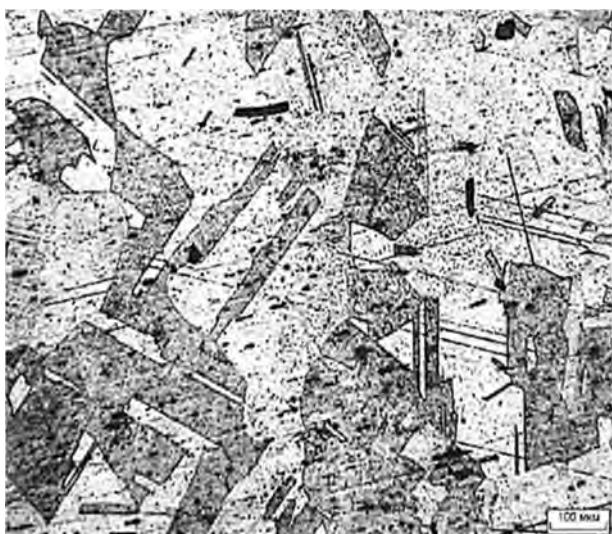


Рис. 1. Зависимости усилия волочения  $Q$  и микротвердости  $HV_{0.2}$  от относительного обжатия  $\varepsilon$  (а, в) и коэффициента вытяжки  $\mu$  (б, г)

Пластическая деформация происходит в результате скольжения и двойникового (поворот одной части кристалла в положение симметричное другой его части), что характерно для металлов с гранцентрированной кубической решеткой – аустенитным сталям. Наиболее выраженное изменение структуры наблюдается при  $\varepsilon 0,17...0,21$ . С ростом  $\varepsilon$  от 0,21 до 0,44 количество двойников увеличивается. Размеры зерен при этом составляют: в продольном направлении – 8...11 мкм, в поперечном – 2,5...4,8 мкм (рис. 2, б). Зерна приобретают не эллипсоидную (как при прокатке), а волнообразную форму, которая получается вследствие удлинения зерна в направлении волочения и одновременного изгиба по типу вращения вокруг оси трубы. Свой вклад в упрочнение материала трубы вносит и аустенитно-мартенситный переход, который происходит в процессе деформации. Так, процент мартенсита с ОЦК-решеткой может вырасти на 40 % при  $\varepsilon = 0,44$ .

а)



закалка 1150 °С, ×50

б)

 $\varepsilon = 0,27$ , ×50

Рис. 2. Микроструктура образцов до и после волочения (×50)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 180–187.



УДК 621.787

## УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СОВМЕЩЕННЫМ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ НАКАТЫВАНИЕМ В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

А. М. ДОВГАЛЕВ, Д. М. СВИРЕПА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

На машиностроительных предприятиях Республики Беларусь изготавливается достаточно широкая номенклатура деталей подшипников скольжения из различных материалов, в том числе из дорогостоящих цветных металлов и сплавов.

Для снижения себестоимости изготовления подшипников скольжения, за счет экономии дорогостоящих материалов и повышения их долговечности, предложено основные элементы подшипников скольжения изготавливать из дешевых малоуглеродистых сталей, а их рабочие поверхности формировать методом нанесения антифрикционных покрытий совмещенным магнитно-динамическим накатыванием в специальной технологической среде. В качестве основного компонента специальной технологической среды, определяющего материал рабочей поверхности деталей подшипников скольжения, предложено использовать ультра- и мелкодисперсные порошки бронзы, меди и латуни [1].

Установлены зависимости влияния режимов процесса модифицирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей магнитно-динамическим накатыванием с формированием антифрикционных покрытий на шероховатость рабочей поверхности колец подшипников скольжения.

Выявлено влияние числа рабочих ходов комбинированного магнитно-динамического накатника на модифицирование поверхностного слоя обрабатываемых деталей, а именно толщину формируемого покрытия на деталях подшипников скольжения при их совмещенной магнитно-динамической обработке в специальной технологической среде.

Выполнена оптимизация процесса формирования рабочей поверхности подшипников скольжения методом совмещенной магнитно-динамической обработки. Определены оптимальные режимы процесса совмещенной магнитно-динамической обработки.

Установлено, что совмещенная магнитно-динамическая обработка в специальной технологической среде обеспечивает упрочнение поверхностного слоя и повышение износостойкости элементов подшипников скольжения в 2,1–2,6 раза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свирепа, Д. М. Усовершенствование технологий получения антифрикционных металлических покрытий методом СМДН / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалева // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 63.

УДК 621.914.1

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

А. А. ЖОЛОБОВ, О. Н. ШИШОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Результаты исследований, приведенные в [1–3], не учитывают то, что для высокоскоростной обработки отверстия фрезерованием существует возможность применения нескольких инструментов, отличающихся конструктивно, но имеющих один и тот же подходящий для обработки диаметр. Соответственно, возникает проблема выбора фрезы, обеспечивающей наибольшую эффективность указанного процесса с точки зрения основного времени  $T_o$  + работы  $A$ , затраченных на процесс.

Цель исследований – выбор инструмента, обеспечивающего наибольшую эффективность обработки отверстия, со следующими параметрами: длина  $L = 30$  мм, диаметр формируемого отверстия – 70 мм; шероховатость поверхности после обработки – 1,25...2,5 мкм по  $Ra$ ; материал заготовки – сталь 45. Также следует обратить внимание на то, что диаметр отверстия, полученный на предшествующей обработке, равен 38 мм.

Исходя из [4], расчетный диаметр фрезы  $D_\phi = 19$  мм. Однако при резании в конструкции фрезы необходимо учесть радиус режущей пластины и ее ширину [5].

Для рассматриваемого примера в соответствии с каталогом [5] выбраны концевые фрезы фирмы Sandwik, диаметр которых максимально близок к расчетному, с режущими кромками не только на периферии рабочей части, но и на его торце (благодаря этому формирование дна ступени осуществляется без смены инструмента при чистовой обработке в первую очередь):

– концевая фреза № 1 R216.24-20050GCL44P 1620, диаметр которой максимально близок к расчетному:  $D_\phi = 20$  мм, число эффективных периферийных режущих кромок  $z = 4$ , максимальная глубина резания в продольном направлении  $a_p = 44$  мм, рабочая длина – 100 мм, максимальная частота вращения  $n_{\max} = 80000$  мин<sup>-1</sup>. Материал инструмента – 1620, его основа – НС, покрытие – PVD TiAlN;

– фреза насадная № 2 R3104-20T10-11M с твердосплавными пластинами R3104-11 T3 16E-PM 4340:  $D_\phi = 20$  мм, число эффективных периферийных режущих кромок  $z = 3$ , максимальная глубина резания в продольном направлении  $a_p = 10$  мм, максимальная частота вращения  $n_{\max} = 111040$  мин<sup>-1</sup>. Материал инструмента – 4340, его основа – НС, покрытие – CVD TiCN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN;

– фреза насадная № 3 R3104-20T10-11L с твердосплавными пластинами R3104-11 T3 16E-PM 1130:  $D_\phi = 20$  мм, число эффективных периферийных

режущих кромок  $z = 2$ , максимальная глубина резания в продольном направлении  $a_p = 10$  мм, максимальная частота вращения  $n_{\max} = 111040$  мин<sup>-1</sup>. Материал инструмента – 1130, его основа – НС, покрытие – PVD AlTiCrN.

При определении основного времени  $T_o$  и работы  $A$ , затрачиваемых на выполнение технологической операции (переходов), для каждого из возможных вариантов принимались оптимальные для современных режущих инструментов и технологического оборудования режимы резания [6].

Основное время  $\sum T_o$  и работа  $\sum A$ , затраченные на высокоскоростное фрезерование отверстия с  $\varnothing 38$  до  $\varnothing 70$  мм и  $L = 30$  мм, методом винтовой интерполяции инструментом № 1  $\sum T_{o1в} = 10,711$  с,  $\sum A_{1в} = 13,119$  кДж, инструментами № 2  $\sum T_{o2в} = 51,640$  с,  $\sum A_{2в} = 55,740$  кДж и № 3  $\sum T_{o3в} = 77,460$  с,  $\sum A_{3в} = 83,611$  кДж, методом круговой интерполяции инструментом № 1  $\sum T_{o1к} = 14,820$  с,  $\sum A_{1к} = 18,025$  кДж, инструментами № 2  $\sum T_{o2к} = 63,106$  с,  $\sum A_{2к} = 69,169$  кДж и № 3  $\sum T_{o3к} = 108,105$  с,  $\sum A_{3к} = 103,753$  кДж.

Фреза № 1 является наиболее производительной, потому что она требует меньше времени и ресурсов для выполнения обработки отверстия диаметром  $D = 70$  мм и  $L = 30$  мм, по сравнению с фрезами № 2 и 3.

На основе вышеизложенного представлена методика выбора наиболее эффективного инструмента для высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оленин, Л. Д.** О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) / Л. Д. Оленин, Д. И. Очечкин // Изв. МГТУ «МАМИ». – 2014. – № 3 (21). – С. 25–31 с.
2. **Скуратов, Д. Л.** Линейная математическая модель для определения рациональных условий обработки на операциях чистового концевого фрезерования при изготовлении деталей авиационной техники / Д. Л. Скуратов // Вестн. СГАУ им. акад. С. П. Королёва. – 2012. – № 5. – С. 93–99.
3. Повышение эффективности процесса фрезерования отверстий мелкоразмерным инструментом в условиях автоматизированного производства / В. М. Давыдов [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2021. – № 10. – С. 13–21.
4. **Кляус, О. Н.** К вопросу определения оптимального метода высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием / О. Н. Кляус, А. А. Жолобов // 56 Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, Витебск, 19 апр. 2023 г. – Витебск: ВГТУ, 2023. – С. 409–411.
5. Каталог SANDVIK COROMANT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com.ru>. – Дата доступа: 19.01.2023.
6. **Сысоев, С. К.** Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 352 с.: ил.

УДК 621.923.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПНЕВМОУДАРОМ

Е. В. ИЛЬЮШИНА, О. Е. ПЕЧКОВСКАЯ, В. С. КООВИТ, А. В. МУХА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Оценка качественных характеристик поверхностного слоя алюминиевых сплавов может быть проведена на основе параметров шероховатости. Установлена взаимосвязь параметров шероховатости по международному стандарту DIN EN ISO 13565:1998 с эксплуатационными свойствами деталей машин: контактная жесткость, износостойкость, усталостная прочность, трение, коррозионная стойкость, виброустойчивость, герметичность соединения, прочность.

Будем использовать профилометрию для измерения шероховатости поверхности и анализа полученных данных. Исследуем профилограммы и проведем сравнительный анализ параметров шероховатости исходной плоской поверхности алюминиевых заготовок и поверхности после упрочняющей обработки пневмоударом.

Скорость протекания процесса износа в паре трения связана с величиной контакта, зависящей от качества поверхности. Для снижения износа используется смазка поверхностей, а для удержания смазки – микрорельеф, позволяющий задерживать масло. Увеличение высоты неровностей  $Ra$ , по сравнению с оптимальным значением, повышает изнашивание за счет возрастания механического зацепления и среза неровностей. Уменьшение высоты неровностей, по сравнению с оптимальным значением, резко увеличивает изнашивание за счет молекулярного сцепления, которое возникает из-за плохого удержания смазки на зеркальных поверхностях. Исследование поверхностей после упрочняющей пневмоударной обработки показало образование луночного микрорельефа, что способствует удержанию смазочного материала на поверхности.

Пневмоударная обработка также повышает усталостную прочность сплава, что снижает риск разрушения материала при циклических нагрузках. В тонком поверхностном слое материала происходит зарождение усталостных разрушений, которые напрямую зависят от величины шероховатости. Микронеровности являются концентраторами напряжений, чем меньше величина шероховатости  $Ra$ , тем менее подвержен усталости материал. Установлено, что после упрочняющей пневмоударной обработки шероховатость поверхности  $Ra$  снижается.

Установлено, что поверхность, обработанная упрочняющей пневмоударной обработкой, показывает хорошие результаты при работе в парах трения. За счет уменьшения глубины профиля сердцевинной шероховатости  $Rk$  после обработки пневмоударом происходит увеличение несущей способности материала, снижается время приработки поверхностей и коэффициент трения. В таких соединениях легче обеспечить герметичность и контролировать утечки.

УДК 621.923.4

## ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПНЕВМОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Е. В. ИЛЬЮШИНА, Н. М. ЮШКЕВИЧ, В. С. КООВИТ, А. В. МУХА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Проектирование инструмента и пневмосистемы для упрочняющей пневмоударной обработки начинается с изучения методики проектирования и анализа уже существующих конструкторских решений, а также тщательной проработки поставленной задачи для получения необходимых результатов обработки.

Для обеспечения подвода сжатого воздуха к инструменту в процессе пневмоударной обработки используется пневмосистема, включающая в себя компрессор, трубопроводы, регуляторы давления, маслоотделитель, манометры, краны, сопла и другие элементы, обеспечивающие передачу сжатого воздуха к инструменту. При проектировании пневмосистемы и инструмента необходимо учитывают следующие аспекты.

1. Выбор основных конструктивных и геометрических параметров элементов (определение диаметра трубопровода подводящей системы, установка параметров инструмента, включая диаметр осевого канала, количество и диаметр сопел, деформирующих элементов, а также определение необходимых зазоров).

2. Расчёт расстояния от инструмента до источника питания (рассмотрение эффектов перепада давления при передаче сжатого воздуха через длинный трубопровод, учитывание потерь энергии на местные сопротивления, зависящие от длины трубопровода, его состояния, диаметра и местных сопротивлений).

3. Оптимизация параметров подводящей системы (минимизация потерь давления и энергии в системе, учет параметра шероховатости трубопровода, его материала, диаметров и оптимизация зазоров).

4. Рационализация системы сброса отработавшей среды (расчет диаметра и количества сопел для выхода воздуха в атмосферу).

5. Выбор технических характеристик элементов пневмосистемы (работа с техническими характеристиками элементов, чтобы обеспечить эффективность и надежность пневмосистемы).

6. Процесс пневмоударной обработки будет стабильным только при оптимальном перепаде давлений на входе и выходе, а также в камере расширения инструмента, поэтому необходимо обеспечить соответствующее сопротивление выходу отработавшей среды в атмосферу за счет предварительного расчета величины расхода сжатого воздуха в инструменте.

Только учитывая все вышеописанные условия получится спроектировать инструмент и пневмосистему для пневмоударного упрочнения. При этом необходимо помнить, что наиболее значимым критерием при проектировании является площадь проходного сечения подводящей системы, влияющая на величину расхода сжатого воздуха в инструменте и производительность процесса.

УДК 621.83

## ВЛИЯНИЕ УГЛОВ ПОДЪЕМА МНОГОПЕРИОДНЫХ ДОРОЖЕК НА ТОЧНОСТЬ И КПД ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

А. В. КАПИТОНОВ, А. Ш. КУРБАННАЗАРОВ, В. С. ДРОЗДОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Углы подъема многопериодных дорожек влияют на точность изготовления, плавность работы и КПД планетарной передачи. С увеличением угла подъема относительно его оптимального значения увеличивается средний радиус и амплитуда многопериодной дорожки, что удлиняет путь резания и повышает влияние на обработку геометрических неточностей технологического оборудования, упругих деформаций технологической системы, износа режущего инструмента [1]. Это приводит к снижению точности изготовления многопериодных дорожек. При больших углах подъема увеличиваются значения окружных скоростей и ускорений сателлитов, что нарушает плавность работы передачи. Поэтому для повышения точности при проектировании и изготовлении планетарных передач с телами качения нужно стремиться к оптимальным углам подъема, которые рассчитываются из условия обеспечения наибольшего КПД.

Известны методы и методики расчета геометрических параметров и КПД планетарных передач с телами качения шариками и роликами с беговыми дорожками, замкнутыми на плоскости [2]. Однако в этих исследованиях представлены лишь некоторые зависимости, связывающие геометрические параметры и КПД передачи, и предложены общие методы и методики расчета. Требуются более широкие исследования влияния геометрических параметров деталей зацепления на КПД планетарных передач данного типа.

Разработана методика и получены математические зависимости, позволяющие определить оптимальные геометрические параметры планетарных передач с телами качения [2] для повышения их КПД. Определены наибольшие значения КПД передач в зависимости от оптимальных углов подъема многопериодных беговых дорожек для разных передаточных отношений. Установлены оптимальные значения среднего радиуса и амплитуды, получены их наилучшие соотношения, обеспечивающие наибольший КПД передачи. Выполненные исследования могут использоваться при проектировании передач данного типа.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капитонов, А. В. Математическое моделирование кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2003. – № 2 (5). – С. 44–48.
2. Автоматизированное проектирование конструкций малогабаритных радиально-плунжерных редукторов с использованием современных САПР / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 25–32.

УДК 621.83

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ШАРИКОВОМ  
И РОЛИКОВОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ

А. В. КАПИТОНОВ, А. Ш. КУРБАННАЗАРОВ, В. С. ДРОЗДОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Звенья планетарных шариковых и роликовых передач испытывают большие контактные напряжения. Наибольшие напряжения возникают в шариковых передачах, т. к. контактирующими элементами являются сателлиты-шарики с небольшими поверхностями контакта, взаимодействующие с ведущей и ведомой беговыми дорожками, а также с рабочими поверхностями водила-сепаратора [1].

Рассмотрена схема планетарного шарикового редуктора. Проведены расчеты упругих напряжений и деформаций (перемещений) сателлитов-шариков и деталей звеньев передачи. В расчетах принимались действующие нормальные силы, приложенные к звеньям и силы инерции сателлитов с учетом их направления движения. Суммарная расчетная сила умножалась на коэффициент, учитывающий распределение этой силы на рабочие сателлиты по степени их загруженности. Для расчета принят одноступенчатый шариковый планетарный редуктор с передаточным отношением, равным семи. Заданы материал (легированная сталь) и его механические свойства.

В результате исследований установлено, что для принятых условий контактные напряжения шариковой передачи имеют большие значения, но они не превышают допусковых. При деформации под нагрузкой центр сателлита-шарика смещается относительно его номинального положения и сателлит передает вращение по измененной траектории движения, отличной от номинальной, что приводит к образованию кинематической погрешности механизма [2].

Разработан метод расчета кинематической погрешности от влияния упругих деформаций для данного типа планетарных передач, который заключается в определении перемещений деталей зацепления звеньев и, соответственно, центра сателлита передачи от действия сил при работе под нагрузкой, определении координат центра сателлита и его углового положения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированное проектирование конструкций малогабаритных радиально-плунжерных редукторов с использованием современных САПР / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 25–32.

2. Капитонов, А. В. Методика оценки и анализ кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 88–97.

УДК 621.7

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МНОГОГРАННЫХ  
НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ ПЛАСТИН  
С ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

В. М. КОМАРОВСКАЯ<sup>1</sup>, А. П. ЛЕВШУКОВ<sup>2</sup>,В. И. САКОВСКИЙ<sup>2</sup>, Ю. А. ДУБОЛЕКО<sup>3</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет<sup>2</sup>ОАО «Минский завод шестерен»<sup>3</sup>Белорусский институт системного анализа

и информационного обеспечения научно-технической сферы

Минск, Беларусь

Известно, что увеличение жизненного цикла режущего инструмента, в том числе с применением современных износостойких покрытий, является весьма актуальной задачей как с научной точки зрения, так и с практической. На ОАО «МЗШ» значительную долю механической обработки занимает токарная (~60 %), при этом в качестве режущего инструмента используются токарные резцы с многогранными неперетачиваемыми пластинами (МНП). Средний расход пластин в год на ОАО «МЗШ» составляет около 6 000 шт., что в денежном выражении составляет около 1 000 000 белорус. р., средняя доля инструмента в себестоимости изделий достигает ~3 %, т. е. увеличение стойкости МНП позволит уменьшить расходы предприятия.

В связи с экономическими санкциями в Республике Беларусь остро встал вопрос поставки МНП с покрытиями. На данный момент основным поставщиком МНП является Китайская Народная Республика (КНР). В то же время на ОАО «МЗШ» установили, что при токарной обработке одной и той же детали при одинаковых режимах резания стойкость МНП значительно отличается в зависимости от производителя (в ряде случаев в 2 раза). В связи с этим остро встал вопрос определения оптимального состава МНП, а также необходимо установить оптимальные значения радиуса скругления режущей кромки и шероховатости поверхности. Для этого на предприятии ОАО «Минский завод шестерен» проведены промышленные испытания сменных токарных пластин типа WNMG 080408-PM I. С целью получения объективных результатов испытания МНП проводились в равных условиях на токарном станке с ЧПУ PUMA GT2600 DOOSAN (МЦ-1, ОАО «МЗШ») при соблюдении следующих режимов обработки: обрабатываемый материал – сталь 20ХН3А; глубина резания за проход – 1,5 мм; подача на оборот – 0,35 мм/об; скорость резания – 130 м/мин; время цикла операции – 2,15 мин/дет.; СОЖ – Витолл-100.

Характеристики образцов МНП представлены в табл. 1. Критерий потери режущей способности пластины при испытаниях – появление сколов, износа, разрушение (рис. 1). После проявления критериев потери режущей способности исследуемые пластины сравнивались с образцами без покрытия или с другими материалами покрытия. Далее делались выводы о повышении или уменьшении стойкости по сравнению с выбранными эталонами.



Табл. 1. Характеристики образцов

Состав, производитель	Покрытие	Радиус скругления, мкм	Температура спекания, °С
TiC 5 %; Co 9,3 %; WC 85,7 % (РБ)	–	Неполированная	1380
TiC 5 %; Co 9,3 %; WC 85,7 % (РБ)	–	84	1380
TiC 4,9 %; Co 11,7 %; WC 83,4 % (РБ)	–	50	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (РБ)	–	50	1400
TiC 4,9 %; Co 11,7 %; WC 83,4 % (РБ)	–	100	1380
TiC 4,9 %; Co 11,7 %; WC 83,4 % (РБ)	–	90	1380
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (РБ)	–	90	1387
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (РБ)	AlTiN	80	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (РБ)	AlTiN	80	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (РБ)	AlTiN	80	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (РБ)	AlTiN	80	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (Китай)	AlTiN	Неполированная	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (Китай)	TiN	Неполированная	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (Китай)	TiN	Неполированная	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (Франция)	TiN	Неполированная	1400
TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % (Китай)	AlTiN	Неполированная	1371



Рис. 1. Образцы МНП после промышленных испытаний

По результатам испытаний установили, что максимальная стойкость 4370 с/гр. (секунд на одну грань) характерна пластинам с содержанием TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % и покрытием AlTiN.

Наименьшей стойкостью обладают пластины с содержанием TiC 5 %; Co 9 %; WC 86 % и покрытием TiN. Стойкость пластины составила 750 с/гр.

Стойкость пластин без покрытия для всех вариантов состава материала пластины не превысила 300 с/гр.

Также в ходе проведения промышленных испытаний определены оптимальные значения радиуса скругления режущей кромки 70...90 мкм и шероховатости  $Ra$  0,3...0,4 мкм.

УДК 621.9.047.7

МОРФОЛОГИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕА. Ю. КОРОЛЁВ<sup>1</sup>, Г. М. СЕНЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

В процессе финишной электролитно-плазменной обработки (ЭПО) на сьем металла оказывают влияние основные технологические параметры, такие как напряжение, температура электролита, глубина погружения изделия в электролит. Наиболее интенсивной обработке подвергаются выступающие поверхности, наружные конструктивные элементы изделия, заусенцы, острые кромки, а наименее интенсивная обработка происходит на внутренних поверхностях – в пазах, отверстиях, канавках. Установление характера протекающих анодных процессов на различных участках внутренней поверхности, а также определение морфологии и качества их обработки, являются важными задачами при разработке процессов ЭПО изделий сложной формы [1].

В качестве внутренней поверхности в работе рассматривалась поверхность сквозного цилиндрического отверстия ограниченной длины, наиболее простым примером которой является труба с изолированной внешней поверхностью. Для оценки неравномерности обработки выполнялась ЭПО отрезков труб из коррозионно-стойкой стали AISI 304. Обработка выполнялась в 5-процентном водном растворе сульфата аммония при температуре 90 °С. Общая продолжительность обработки образцов составляла 5 мин.

Результаты изменения электрических условий на внутренней поверхности в процессе ЭПО могут быть наглядно продемонстрированы неравномерностью обработки участка, расположенного возле края образца. На рис. 1 представлены фотографии обработанных отрезков труб с внутренним диаметром 28, 18 и 9,5 мм, разрезанных вдоль продольной оси. Из-за большого градиента электрического поля на внутренней поверхности трубы в процессе ЭПО образуются характерные зоны. Вблизи от края образца формируется полированная зона с высоким коэффициентом отражения. Такая поверхность свойственна для ЭПО. Протяженность полированной зоны снижается с уменьшением внутреннего диаметра обрабатываемого образца. По мере удаления от торцевой поверхности полированная зона переходит в матовую. На образцах без полированной поверхности матовая зона формируется начиная с края образца. В матовой зоне преобладают процессы растравливания. Существующие при этом электрические условия не позволяют сформироваться стабильной парогазовой оболочке для протекания устойчивого процесса ЭПО. За матовой зоной на поверхности осаждается окисная пленка, образующаяся вследствие обратного выделения растворенных в электролите продуктов обработки.

Микрофотографии поверхности характерных зон (с указанием параметра шероховатости  $Ra$ ), формирующихся внутри трубы, приведены на рис. 2. На

исходной поверхности (см. рис. 2, *a*) присутствуют микротрещины и царапины. Значение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  исходной поверхности составляет 0,158 мкм.

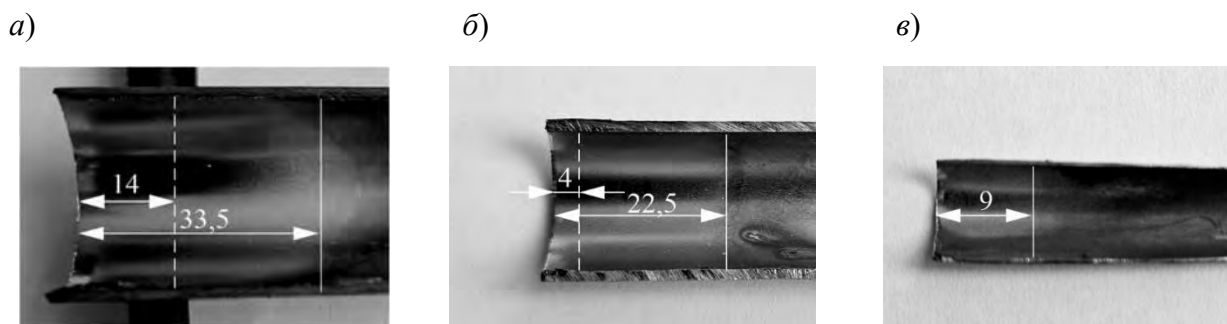


Рис. 1. Состояние внутренней поверхности труб различного диаметра после ЭПО продолжительностью 5 мин: *a* – 28 мм; *b* – 18 мм; *v* – 9,5 мм

Поверхность полированной зоны имеет сглаженную структуру с выделенными границами зерен (см. рис. 2, *b*). При этом качество поверхности относительно исходного состояния повышается ( $Ra = 0,112$  мкм). Поверхность, соответствующая матовой зоне, имеет пористую структуру, сформированную скоплениями питтингов размерами 1...2 мкм (см. рис. 2, *v*). Наряду с интенсивным питтингообразованием в этой зоне также происходит растравливание микротрещин, присутствующих на исходной поверхности, с увеличением их поперечных размеров. Качество поверхности в этой зоне ухудшается относительно исходного состояния ( $Ra = 0,187$  мкм). Морфология и шероховатость поверхности с окисной пленкой (см. рис. 2, *z*) соответствуют исходному состоянию.

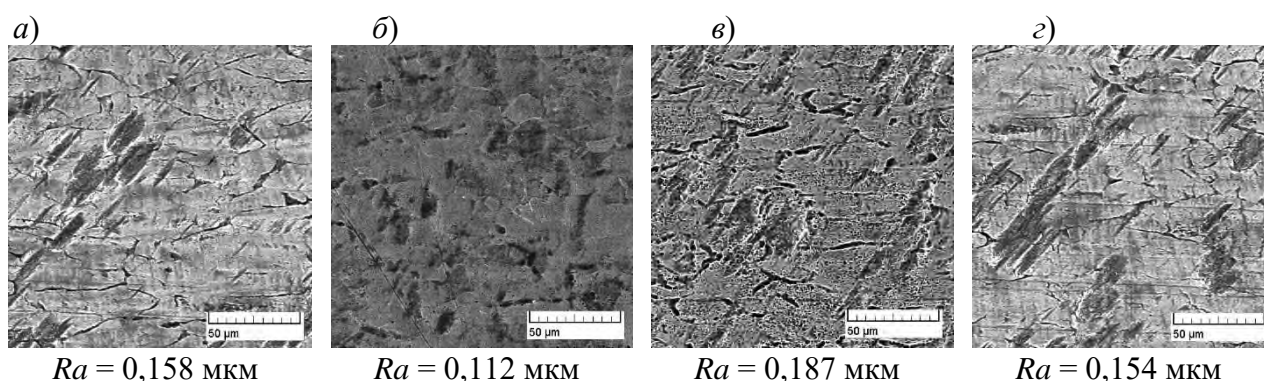


Рис. 2. Микрофотографии характерных зон на внутренней поверхности: *a* – исходная поверхность; *b* – полированная зона; *v* – матовая зона; *z* – зона с окислом

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy / A. Korolyov [et al.] // Mathematical models in engineering. – Kaunas: JVE international, 2021. – Vol. 7, iss. 4. – P. 70–80.

УДК 621.785

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КРЕСТОВИН КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

Г. А. КОСТЮКОВИЧ<sup>1</sup>, А. В. ПОПРУКАЙЛО<sup>1</sup>,  
Е. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup>, Д. А. ЛИННИК<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Белкард»<sup>2</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы  
Гродно, Беларусь

Крестовина передней передачи является высоконагруженной деталью и испытывает статические, динамические и циклические нагрузки. Через крестовину передается весь крутящий момент двигателя, изменяющийся как по величине в процессе движения автомобиля, так и по скорости приложения при броске сцепления. Кроме того, шипы крестовины, являясь в большинстве конструкций внутренней опорой игольчатого подшипника, испытывают высокие контактные напряжения, приводящие к дефектам, называемым бринеллированием (вдавливание иголок в тело шипов) [1, 4].

Практика показывает, что с целью достижения высокого сопротивления контактным напряжениям, твердость в зонах воздействия иголок должна превышать 61 HRC, а глубина слоя с высокой твердостью должна быть не менее 1,5 мм. У основания шипа для предотвращения хрупкого разрушения, свойственного стали с высокой твердостью, последнее может быть снижено до уровня 51...63 HRC. Такой уровень обеспечивает повышение сопротивления статическим и динамическим нагрузкам и достаточен для предотвращения износа от уплотнений, работающих у основания шипов. Глубина высокопрочного слоя у основания крестовины должна составлять 1,5...3,5 мм. При этом, если в вершине шипа глубина высокопрочного слоя может равняться радиусу шипа (т. е. быть сквозной), то у основания шипа глубина слоя выше 3,5 мм недопустима, т. к. при этом уменьшается характерный для поверхностной закалки высокий уровень остаточных напряжений сжатия, обеспечивающий достаточное сопротивление циклическим нагрузкам. При сквозном высокопрочном состоянии металла у основания шипа усталостная прочность крестовины снижается [1, 2].

В настоящее время крестовины изготавливаются из легированных цементуемых сталей типа 20ХГНТР, 20ХГТ, 15ХГН2ТА, которые подвергаются цементации на глубину 1,5...2 мм, закалке и отпуску.

Другой, более прогрессивный, способ заключается в том, что крестовины изготавливают из стали пониженной прокаливаемости 60 ПП, подвергают поверхностной индукционной закалке при глубинном нагреве, а затем производят прерывистый самоотпуск [3]. Преимущества данного способа заключаются в следующем.

1. Прочность крестовин увеличивается на 15 %...20 %.
2. Сталь 60 ПП дешевле легированных цементуемых марок стали.
3. Установка для индукционной закалки в несколько раз дешевле печей для цементации той же производительности.

4. Расходы, связанные с проведением термообработки, на газ, электроэнергию, жароупоры, амортизацию, также меньше.

5. Время термической обработки сокращается с 20 ч до 3 мин.

Кроме того, данный способ позволяет получить высокий комплекс механических свойств крестовин, превышающий уровень, достигаемый при цементации.

Индивидуальная обработка, характерная для индукционной закалки, дает возможность получить распределение свойств по длине шипов, в соответствии с действующими там нагрузками. Так, если при цементации твердость и глубина высокопрочного слоя постоянна по всей длине, то при индукционной закалке и прерывистом самоотпуске удастся получить особо высокую твердость (более 61 HRC) и большую глубину высокопрочного слоя у вершины шипов, где действуют высокие контактные напряжения, и пониженную твердость 50...56 HRC при небольшой глубине этого слоя у основания шипа. Это обеспечивает высокое сопротивление максимальным на этом участке статическим, динамическим и циклическим нагрузкам при сохранении достаточного уровня сопротивления износу [3].

Однако индивидуальная обработка при индукционной закалке требует разработки технологии упрочнения для каждого типа размера крестовин с созданием индивидуального оборудования и оснастки.

Проведенные испытания крестовин, изготовленных по двум технологиям, показали следующее.

1. Крестовины из стали 60 ПП при кручении почти на 20 % превосходят серийные из цементуемых марок стали по пределу прочности.

2. Циклическая долговечность на всех уровнях нагружения у крестовин из стали 60 ПП больше, чем у серийных из цементуемых марок стали, в 5–10 раз.

Повышение статических свойств следует связывать со снижением хрупкости стали у основания крестовины за счет снижения уровня твердости на этом участке, а высокий уровень усталостной прочности – с наличием значительных сжимающих остаточных напряжений, характерных для поверхностной закалки с применением нагрева ТВЧ.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кравченко, В. И.** Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 400 с.

2. Карданные передачи ОАО «Белкард» и перспектива развития их конструкций / Г. А. Костюкович [и др.] // Тр. НАМИ. – 2019. – № 3 (278). – С. 43–52.

3. **Шепеляковский, К. З.** Самоотпуск при высокочастотной закалке / К. З. Шепеляковский. – Москва: Машгиз, 1955. – 216 с.

4. **Малаховский, Я. Э.** Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденев. – Москва, 1962. – 156 с.

УДК 67.05

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ЛЕНТОЧНОПИЛЬНЫХ ОТРЕЗНЫХ СТАНКОВ

А. Е. ЛИТВИНОВ, А. А. СИЗО

Кубанский государственный технологический университет  
Краснодар, Россия

Определение оптимального режима обработки заготовки является неотъемлемой частью технологического процесса, определяющего всю его сущность и практичность. Время резания, качество отрезаемых заготовок, расход материала, срок службы – все эти параметры являются решающими факторами технологического процесса.

Выделяют следующие критерии процесса резания на ленточнопильном станке [1]:

- стойкость пилы;
- отклонение полотна пилы от первоначального положения;
- пропиленная часть заготовки за единицу времени;
- структура поверхности пропиленной заготовки.

О неправильно выбранном режиме резания сигнализируют излишняя вибрация, волнистость режущего инструмента, что приводит к уменьшению срока службы пилы и увеличению расхода материала.

Оптимального режима резания возможно добиться путем регулирования скорости и подачи.

Подача  $S$  – величина перемещения пильной рамы, мм/мин.

Скорость  $V$  – скорость движения зубьев пилы в направлении главного движения, м/мин.

Использование главного и вспомогательного прямолинейных движений позволяет добиться наиболее оптимальной траектории движения пилы. На рис. 1 изображена принципиальная схема процесса резания.

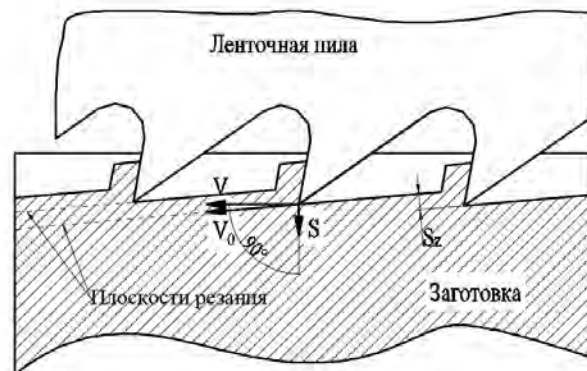


Рис. 1. Схема процесса резания

Зная шаг зубьев  $t$ , скорость движения пилы  $V$  и подачу  $S$ , можно определить величину  $S_z$  [2]:

$$S_z = \frac{t \cdot S}{V},$$

где  $S_z$  – подача на один зуб пилы, мкм;  $t$  – шаг зубьев, мм;  $S$  – подача пилы, мм/мин;  $V$  – скорость движения пилы, м/мин.

В табл. 1 приведены результаты определения подачи на зуб при скорости резания 60 м/мин.

Табл. 1. Определение подачи на зуб

$S$ , мм/мин	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$S_z$ , мкм	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0	13,2	14,4	15,6	16,8

Для построения графика (рис. 2) зависимости минутной подачи от скорости ленточной пилы была проанализирована информация относительно оптимальной скорости резания для различных металлов и сплавов [3].



Рис. 2. График зависимости подачи от скорости ленточной пилы

Опираясь на полученные данные, зная скорость ленточной пилы, можно определять требуемую подачу для разных пил, с разным шагом зубьев и устанавливать наиболее оптимальный режим резания заготовки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизо, А. А. Экспериментальные исследования шума шлифовально-ленточных деревообрабатывающих станков / А. А. Сизо, А. Е. Литвинов // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 21–24.
2. Сизо, А. А. Расширение эксплуатационных возможностей ленточных пил металлорежущих станков / А. А. Сизо, А. Е. Литвинов // Фундаментальные и прикладные задачи механики: материалы Междунар. конф. – Москва, 2023. – С. 98–108.
3. Сизо, А. А. Моделирование процесса нагружения ленточных пил отрезных металлорежущих станков / А. А. Сизо, А. Е. Литвинов, Э. Ю. Балаев // XXXIV Междунар. инновац. конф. молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения: сб. тр. – Москва, 2022. – С. 63–68.

УДК 621.785

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В. С. НИСС<sup>1</sup>, А. И. ИВАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Беларусь

Электролитно-плазменное азотирование позволяет насыщать поверхность обрабатываемых сплавов атомами азота, в результате чего получается модифицированный слой толщиной до 100 мкм за время обработки от 5 до 10 мин.

В работе исследовалось влияние состава электролита для электролитно-плазменного азотирования на коэффициент трения поверхности образцов при различной концентрации насыщающего компонента в электролите. Для исследования использовались плоские образцы из титана VT1 и титанового сплава VT6 размерами 25 × 10 × 1 мм. В качестве электролита применялся водный раствор хлорида аммония (10 %) и аммиака водного концентрацией 2,5 %, 5 % и 10 %. Время обработки составляло 5 мин, рабочее напряжение выбиралось из условия обеспечения максимальной температуры нагрева.

Определение коэффициента трения полученных покрытий выполнялось на трибометре FT-3 по схеме с возвратно-поступательным движением индентора. В качестве индентора использовался шар из нитрида кремния диаметром 6 мм. Испытания выполнялись при следующих параметрах: нагрузка – 220 г; скорость прохода – 3000 мм/мин; длина дорожки – 10 мм; расстояние за цикл – 20 мм; расстояние – 200 м; количество циклов – 10000. Пример диаграммы изменения коэффициента трения для образца из титана VT1-0 после обработки в электролите с 10-процентным содержанием аммиака водного приведен на рис. 1.

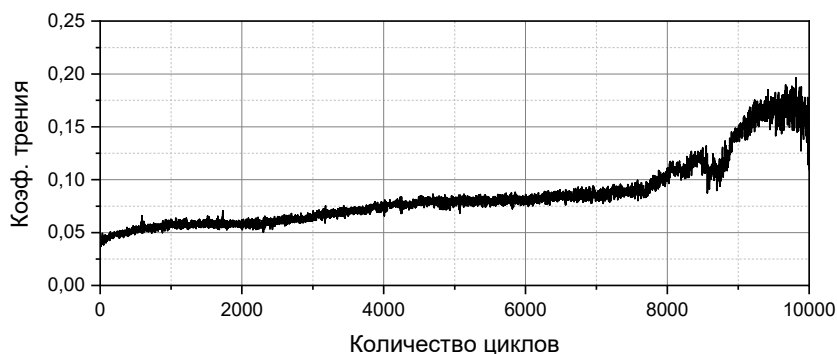


Рис. 1. Диаграммы изменения коэффициента трения для образца из титана VT1-0 после обработки в электролите с содержанием аммиака 10 %

Зависимости, характеризующие динамику изменения коэффициента трения в процессе трибологических испытаний азотированных образцов при различной концентрации аммиака, представлены на рис. 2.



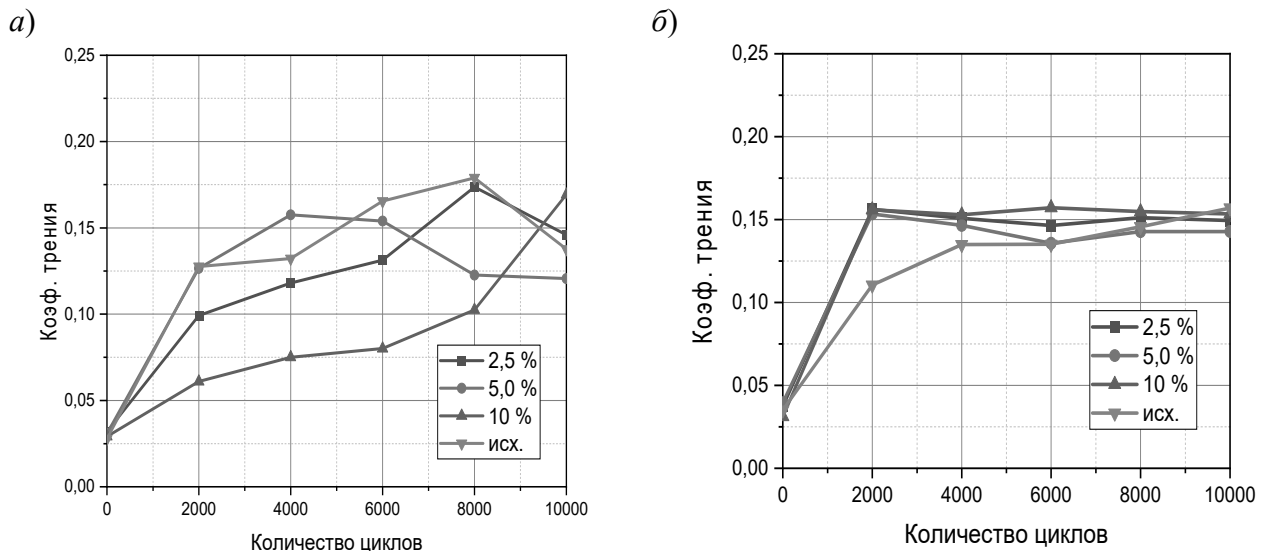


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента трения в процессе трибологических испытаний азотированных образцов при различной концентрации аммиака водного: *а* – ВТ1; *б* – ВТ6

По результатам трибологических испытаний установлено, что исходный образец из титана ВТ1 и образцы, азотированные при концентрации аммиака 2,5 % и 5,0 %, демонстрируют схожую динамику изменения коэффициента трения. При увеличении количества циклов до 1000 наблюдается интенсивный рост коэффициента трения до значений 0,10–0,13. После 4000 циклов значения коэффициента трения стабилизировались в диапазоне 0,12–0,18. К концу испытаний фиксируется снижение коэффициента трения до значений 0,12–0,15. Наименьшие значения коэффициента трения обеспечиваются при концентрации аммиака 10 %. По мере увеличения пути, пройденного индентором, его значение плавно возрастает с 0,03 до 0,10, после чего наблюдается резкое повышение до значения 0,17, что связано с полным износом твердого азотированного слоя и дальнейшим движением индентора по неупрочненной основе.

Динамика изменения коэффициента трения для всех исследованных образцов из сплава ВТ6, в том числе исходного образца, имеет схожий характер. В начальной стадии трибологических испытаний значение коэффициента трения составляет 0,03–0,04, а при увеличении пути, пройденного индентором, до 40 м (2000 циклов) для азотированных образцов значение коэффициента трения стабилизируется в пределах 0,14–0,16. Исходный образец демонстрирует более плавное увеличение коэффициента трения. Стабилизация коэффициента трения на значениях 0,14–0,16 для необработанного образца происходит после 4000 циклов.

УДК 621.91.01

## КРИТЕРИЙ МОМЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОБИРАЕМЫХ ПРОФИЛЕЙ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. М. ПАШКЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

При селективной сборке сложных профилей в качестве входной информации для принятия решения о собираемости конкретных пар применяются большие объемы данных, содержащие массивы координат поверхностей сопрягаемых изделий. При этом решение о сборке соединений, характеризующихся, например, наличием функциональных зазоров, принимается исходя из критерия минимизации вероятных натягов, возникающих из-за пространственной интерференции поверхностей деталей, образующих такие соединения. Решение указанных задач происходит, в подавляющем большинстве случаев, в условиях влияния большого количества погрешностей. Так, оценка отклонений формы координат точек, образующих контур изделий, связана как с систематическими погрешностями измерений (методическими, инструментальными), так и со случайными составляющими, определяемыми состоянием поверхности, влиянием случайных факторов предшествующей механической обработки (технологической наследственностью).

Одной из типичных задач, которые при этом приходится решать, является определение формы и геометрических характеристик прилегающих к поверхности изделия профилей (как правило, идеальной, точной формы – окружностей, цилиндров, шлицевых контуров и др.). Однако, если при вычислении параметров окружностей задача может быть решена аналитически (например, с использованием критерия наименьших квадратов), то при вычислении параметров сложных двухмерных контуров, а тем более трехмерных объектов, такая задача аналитического решения не имеет.

В связи с этим возникает задача об автоматизации процедуры поиска прилегающего (или вписанного) профиля численным методом.

Наиболее распространенным методом для нахождения таких профилей является критерий наименьших квадратов

$$S_{ocm} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $S_{ocm}$  – сумма невязок аппроксимирующего и аппроксимируемого профилей;  $\varepsilon_i^2$  – квадрат отклонения аппроксимирующего (номинального) значения  $\hat{y}_i$  от аппроксимируемого (измеренного)  $y_i$ .

Если принять гипотезу о том, что аппроксимирующий профиль совпадает с математическим ожиданием аппроксимируемого профиля, т. е.  $\hat{y}_i \approx \bar{y}_i$ , то расчет остаточной суммы (1) в этом случае аналогичен процедуре вычисления цент-

рального момента второго порядка с точностью до усреднения по числу измерений. Предложено использовать обобщенные критерии построения таких профилей, основанные на вычислении аналогов центральных моментов иных порядков  $\mu_m$ :

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|^m \rightarrow \min. \quad (2)$$

На рис.1 представлены результаты численного моделирования контуров прилегающих окружностей.

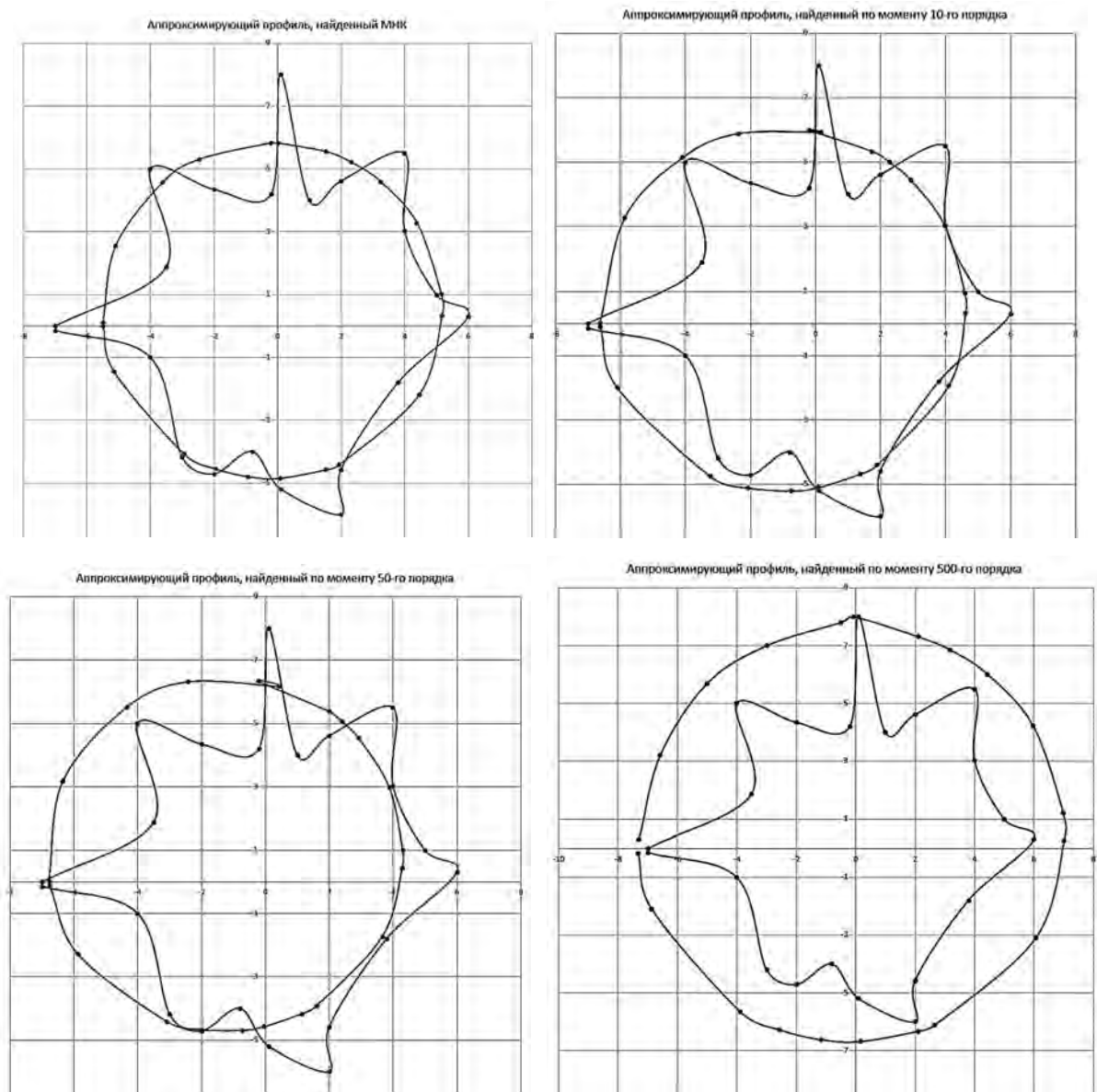


Рис. 1. Приближение к контуру прилегающей окружности с использованием метрик 2, 10, 50 и 500

УДК 621.9

## ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ РАСКАТЫВАНИЕМ И ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Д. М. СВИРЕПА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Два направления научных исследований, разработанных на машиностроительном факультете Белорусско-Российского университета, – магнитно-динамическое раскатывание и обработка тлеющим разрядом – объединены в комплексную обработку [1].

Технология комплексной обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом внутренних цилиндрических поверхностей состоит из следующих операций:

- 1) токарная (тонкое растачивание);
- 2) слесарная (снятие заусенцев);
- 3) магнитно-динамическое раскатывание;
- 4) обработка тлеющим разрядом;
- 5) контрольная.

На токарной операции достигается требуемая точность, шероховатость должна находиться в пределах 6,3...1,6 мкм, в зависимости от требований к готовой детали. На слесарной операции удаляются заусенцы, которые могут остаться после операции точения. На операции магнитно-динамического раскатывания формируется микрорельеф обрабатываемой поверхности и обеспечивается интенсивное снижение шероховатости на 1–2 класса, кроме того, обеспечивается упрочнение поверхностного слоя – микротвердость возрастает на 20 %...25 %. Однако на данной операции точность диаметрального размера, сформированная на предшествующей токарной операции, не меняется ввиду упругой схемы взаимодействия деформирующих шаров с обрабатываемой поверхностью. Обработка тлеющим разрядом осуществляется в вакуумной камере и обеспечивает повышение твердости поверхности еще на 3 %...5 % [2]. На контрольной операции осуществляется проверка размера и шероховатости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свирепа, Д. М.** Актуальность комплексной обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом / Д. М. Свирепа, В. М. Шеменков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 74.
2. **Свирепа, Д. М.** Влияние обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом на шероховатость внутренних цилиндрических поверхностей / Д. М. Свирепа // *Инновационные технологические системы и процессы в машиностроении: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 159–162.

УДК 621.9

## ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ С ФОРМИРОВАНИЕМ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Д. М. СВИРЕПА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Снижение коэффициента трения у пар трения позволяет увеличить их срок службы. Одним из методов снижения коэффициента трения является нанесение антифрикционного покрытия на одну из трущихся поверхностей. Для решения данной задачи предлагается использование технологии магнитно-динамического накатывания с формированием антифрикционного покрытия на модифицируемой поверхности [1].

Технология модифицирования поверхностного слоя деталей машин магнитно-динамическим накатыванием с формированием антифрикционных покрытий состоит из следующих операций: 005 токарная (тонкое растачивание); 010 слесарная (снятие заусенцев); 015 магнитно-динамическое накатывание; 020 магнитно-динамическое накатывание в активной технологической среде; 025 контрольная.

В ходе реализации технологии на каждой из операций решаются следующие задачи: на токарной операции достигается требуемая точность поверхности, поскольку последующие операции не оказывают принципиального значения на изменение данного параметра; на слесарной операции с обрабатываемой поверхностью удаляются возможные заусенцы, частицы стружки и прочие загрязнения; на операции магнитно-динамического накатывания происходит интенсивное снижение шероховатости модифицируемой поверхности на 1–2 класса и создание благоприятного микрорельефа под нанесение антифрикционного покрытия; в ходе реализации операции магнитно-динамического накатывания в активной технологической среде выполняется нанесение на обрабатываемую поверхность заготовки химически активных компонентов для получения антифрикционных металлических покрытий на основе мелкодисперсного порошка Си и повторное комплексное воздействие на обрабатываемую поверхность заготовки магнитно-динамическим накатником, в результате чего на модифицируемой поверхности формируется антифрикционное покрытие, кроме того, происходит дополнительное снижение шероховатости на 56 %...71 %; на контрольной операции выполняется проверка контролируемых параметров.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свирепа, Д. М. Усовершенствование технологий получения антифрикционных металлических покрытий методом СМДН / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 63.

УДК 621.787

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАЛОВ

И. А. ТАРАДЕЙКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Сопротивление износу поверхностей трущихся деталей, особенно в условиях граничного трения, является важным эксплуатационным показателем таких деталей и в значительной степени определяет их стойкость, поэтому его исследование является актуальной задачей, представляющей большой практический и научный интерес [1, 2].

Как правило, для исследования триботехнических свойств поверхностей деталей применяются специальные устройства – многофункциональные машины трения (трибометры), которые отличаются сложностью своей конструкции и достаточно высокой ценой [3]. К тому же, несмотря на то, что набор исследуемых параметров у указанных приборов достаточно широк, он зачастую избыточен, т. к. оценка износа часто является комплексной величиной, определяющей долговечность детали в целом.

Для исследования износа поверхности наружных поверхностей валов предложена специальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

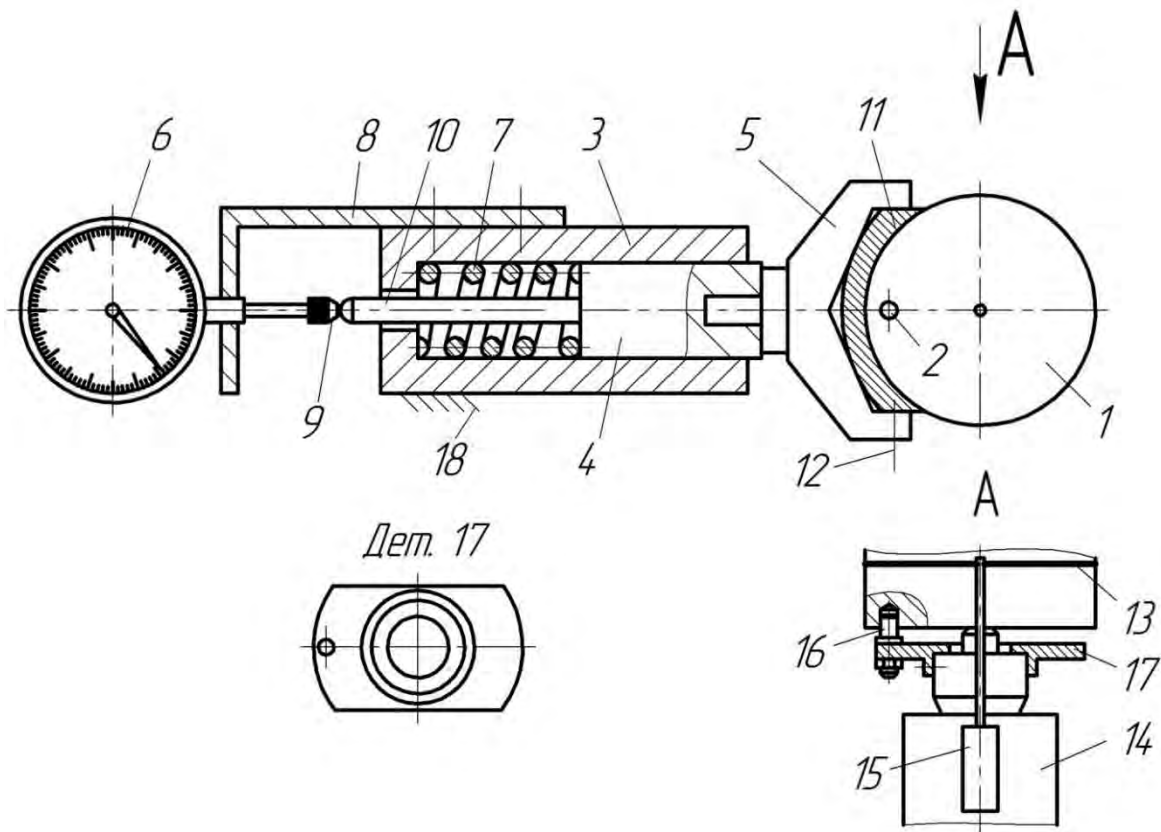


Рис. 1. Устройство для исследования износа поверхности исследуемых деталей

Установка включает в себя следующие основные элементы: деталь 1 с выполненным в ней технологическим отверстием 2; корпус 3; плунжер 4; держатель 5; индикатор часового типа 6. Плунжер 4 установлен в корпусе 3 приспособления, одним своим концом опирается на тарированную пружину 7 и имеет возможность продольного перемещения. Индикатор часового типа 6 жестко закреплен на неподвижной планке 8 и своим измерительным щупом 9 контактирует с выходным концом 10 плунжера 4. В держатель 5 устанавливают притир 11 и закрепляют винтом 12.

Принцип работы установки следующий. Исследуемую деталь 1 закрепляют в патроне, а устройство для износа – в резцедержателе станка. Затем лезвийным инструментом наносят на испытуемой поверхности в окружном направлении клиновидную риску 13 (искусственную базу). Пиноль 14 задней бабки станка с закрепленным на ней профилометром-профилографом 15 выдвигают, фиксируют положение детали 1 пальцем 16, установленным в усеченном фланце 17, вводя его в технологическое отверстие 2, обеспечивая тем самым постоянство сечения, в котором, в дальнейшем, производится измерение, и подпирают деталь 1 центром. Затем строят профилограмму участка с риской, определяя ее фактическую глубину, после чего возвращают пиноль с центром в исходное положение, исключая контакты щупа профилометра-профилографа 15 и поверхности детали 1, а также пальца 16 и технологического отверстия 2.

Радиальным перемещением суппорта 18, с закрепленным на нем устройством, вводят притир 11 в контакт с поверхностью детали 1, и по показаниям индикатора часового типа 6 обеспечивают требуемое усилие прижатия за счет сжатия тарированной пружины 7. Далее детали 1 сообщают вращение. Через установленные промежутки времени измерения повторяют, а величину износа поверхности определяют как изменение глубины заложения технологической базы в исследуемом сечении по принципу, описанному выше.

Таким образом, предложенное устройство обладает достаточно простой конструкцией, а также обеспечивает высокую точность определения величины износа, т. к. его измерения происходят в фиксированном сечении, что исключает случайные погрешности, такие как колебания глубины канавки при нанесении базы и др.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бишутин, С. Г.** Износостойкость деталей машин и механизмов / С. Г. Бишутин, А. О. Горленко, В. П. Малахов; под ред. С. Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.
2. **Тихомиров, В. П.** Трибология: методы моделирования процессов: учебник и практикум для вузов / В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, В. В. Порошин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2023. – 239 с.
3. **Машков, Ю. К.** Трибофизика конструкционных материалов / Ю. К. Машков, О. В. Малий. – Омск: ОмГТУ, 2017.

УДК 621.787

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНО-УДАРНЫМ НАКАТЫВАНИЕМ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

М. В. ТАРАДЕЙКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Перспективным способом отделочно-упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения является способ импульсно-ударного накатывания, основанный на одновременном воздействии на очаг деформирования вращающимся магнитным полем от цилиндрических постоянных магнитов и импульсно-ударным накатыванием.

Однако из-за новизны способа он недостаточно исследован. Нет рекомендаций по выбору режимов обработки, при которых обеспечивается требуемый микрорельеф поверхности. Также нет модели, которая позволила бы прогнозировать параметры качества поверхности от заданных режимов.

В связи с этим стоит актуальная задача по оценке влияния режимов обработки и их учете в расчетной модели.

При указанном способе упрочнения наибольшее влияние оказывает потеря скоростей при соударении деформирующего шара (доля кинетической энергии, затрачиваемой на деформацию микронеровностей поверхности)  $\Delta U_{ш}$  ( $T_d$ ) с упрочняемой поверхностью детали. Указанная потеря скорости может быть найдена из соответствующих математических моделей, описывающих процесс импульсно-ударного упрочнения. Следующие параметры, которые вносят существенное влияние на получаемый микрорельеф поверхности, это осевая подача инструмента  $S$  и поверхностная твердость детали  $HB$ . Влияние на микрорельеф поверхности оказывает также вращающееся магнитное поле, причем анализ литературных источников показывает, что оно как способствует интенсивному снижению шероховатости при импульсно-ударном упрочнении, так и само воздействие импульсного магнитного поля от инструмента с индукцией  $B$  и длительностью импульса  $t$  после ППД также способно вызывать некоторое снижение шероховатости.

Учитывая вышесказанное, можно предложить функцию, описывающую процесс формирования микронеровностей (прогнозирование параметров шероховатости детали), при ее исходной шероховатости  $Rz_{исх}$ .

$$Rz = f_1(Rz_{исх}) - f_2(T_d, B) - f_3(S, HB) - f_4(B).$$

Таким образом, получено выражение, которое в первом приближении позволяет оценить вклад каждого из факторов, влияющих на формирование шероховатости упрочненной поверхности детали при импульсно-ударном деформировании. В дальнейшем необходимо определить значение каждой из функций, основываясь на теоретических рекомендациях или в форме эмпирических зависимостей с применением экспериментальных данных.



УДК 621.941.1

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЧЕРНОВОЙ ТОКАРНОЙ МНОГОПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКИ

А. М. ФЕДОРЕНКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Разработанная ранее методика построения траектории перемещения режущего инструмента при токарной многопроходной обработке и соответствующее программное обеспечение показали свою целесообразность, обеспечив сокращение пути резания инструмента [1]. Существенным недостатком предложенной методики является её применимость только для двухступенчатых валов.

С целью построения и расчета траектории перемещения режущего инструмента, обеспечивающей минимальный путь резания для валов с произвольным количеством ступеней, была разработана и реализована следующая методика:

- рассчитываются координаты по оси  $X$  для каждого продольного хода с учетом предельно допустимого припуска;
- рассчитываются координаты по оси  $Z$  для каждого поперечного хода с учетом предельно допустимого припуска;
- строится геометрическая модель удаляемого слоя металла в виде двумерного массива данных, в котором каждая ячейка соответствует клетке металла со сторонами, равными предельным припускам по осям  $X$  и  $Z$ ;
- формируется текущий вариант удаления припуска в виде бинарного числа, где 0 – соответствует точению вдоль оси  $Z$ ; 1 – вдоль оси  $X$ ;
- выполняется расчет пути резания анализируемого варианта;
- формируется новый вариант путем увеличения бинарного числа на 1;
- выполняется сравнение рассчитываемых вариантов и запоминается случай, обеспечивающий минимальный путь резания.

Предложенная методика была успешно реализована в виде программы для ЭВМ. Ключевой особенностью усовершенствованной методики является построение геометрической модели удаляемого металла в виде двумерного массива данных. Данное решение позволяет задавать для моделирования произвольную геометрическую конфигурацию будущей детали, снимая тем самым ограничения по форме детали, количеству ступеней, виду обработки (наружная или внутренняя) и т. д.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоренко, А. М. Структурная оптимизация черновой токарной многопроходной обработки / А. М. Федоренко // Инновационные технологические системы и процессы в машиностроении: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 175–179.

УДК 621.78

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГЛУБИНУ И СТЕПЕНЬ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

А. Н. ЮМАНОВА, М. А. РАБЫКО, В. М. ШЕМЕНКОВ, С. С. ДУДКИНА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Как известно, сталь является сплавом железа и углерода, однако в таком составе полученный продукт не удовлетворяет эксплуатационным характеристикам, предъявляемым особенно к инструментальным материалам, таким как твердость, теплостойкость и износостойкость. Классическим подходом к решению данной проблемы является введение на стадии расплава в состав стали элементов, позволяющих достигнуть необходимого качества материала.

Как правило, легирующие элементы, помимо влияния на эксплуатационные свойства сталей, оказывают существенное влияние на их структуру и, как следствие, меняют подход к проведению термической обработки.

Как показал опыт проведения упрочняющей обработки легированных инструментальных сталей, легирующие элементы оказывают существенное влияние на технологические параметры процесса. Так, при упрочнении сталей одной группы, но разного химического состава, получаются различные результаты, которые порой кардинально отличаются.

Проведя исследования, было установлено, что на глубину и степень упрочнения при обработке тлеющим разрядом оказывает существенное значение такой электрофизический параметр, как удельное электрическое сопротивление, которое напрямую зависит от наличия легирующих элементов. Так, например, для стали X12, для которой удельное электрическое сопротивление  $\rho$  составляет 560 нОм·м, после обработки тлеющим разрядом глубина упрочненного слоя находится в пределах 70 мкм, но стоит ее дополнительно легировать молибденом и ванадием (X12МФ,  $\rho = 580$  нОм·м), как глубина упрочненного слоя увеличивается до 80 мкм. Легирование быстрорежущей стали P6M5 ( $\rho = 466$  нОм·м) дополнительно кобальтом (P6M5K5,  $\rho = 458$  нОм·м) приводит к снижению глубины упрочненного слоя с 75 до 70 мкм [1].

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шеменков, В. М.** Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.: ил.

УДК 621.78

ИММИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО БАЛАНСА  
ИЗДЕЛИЯ, ПОМЕЩЕННОГО НА КАТОДЕ,  
ПРИ ОБРАБОТКЕ ИМПУЛЬСНЫМ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

А. Н. ЮМАНОВА, В. М. ШЕМЕНКОВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Важным параметром процесса упрочнения поверхности изделий при помощи высококонцентрированных источников нагрева выступает температурное поле. Параметры процессов упрочнения проходят в зависимости от времени при изменении температуры изделия, поэтому определение температуры в определенной точке представляет возможным прогнозирование фазового и структурного состояния.

Определение температуры детали в процессе упрочнения естественным способом вызывает определенные затруднения, связанные с тем, что деталь находится среди остаточных атмосферных газов в закрытой камере, в которой сложно разместить средства измерения и управлять ими. Электронные средства измерения также не позволяют измерить температуру из-за горения тлеющего разряда, который приведет к замыканию цепи электронной системы измерения. Вследствие чего температуру нагрева детали представляется возможным измерить при помощи естественной термопары, однако термопары должны быть расположены максимально близко к наружной поверхности. Кроме того, любая термопара обладает определенной инертностью, вследствие чего невозможно добиться пиковых значений и адекватного градиента температуры по глубине детали, поэтому целесообразно применить процесс имитационного моделирования.

Эффективным способом решения задач по определению напряженно-деформированного и теплового состояния тел является использование автоматизированных систем инженерных расчетов. Перспективной на сегодняшний день CAE-системой для успешного решения различных задач механики твердого тела с учетом теплофизических параметров является программный продукт ANSYS со специализированным интерфейсом Workbench, который используется для поставленных целей имитационного моделирования.

На основании имитационного моделирования упрочнения импульсным тлеющим разрядом с частотой его горения от 25 до 175 кГц установлено, что пиковые температурные значения на поверхности в меньшей степени зависят от частоты горения разряда, а в большей степени – от времени обработки, и достигают до 570...580 К, концентрируясь на углах обрабатываемого изделия. Опираясь на результаты, полученные измерением при помощи естественной термопары, можно сделать вывод, что средняя температура при проведении экспериментов и моделирования совпадает. Следовательно, можно сделать вывод о том, что используемое имитационное моделирование адекватно представляет картину распределения температуры.

УДК 621.74

## ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ СИЛУМИНОВ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

К. Н. БАРАНОВ, А. П. ГУТЕВ, В. П. ГРУША  
Институт технологии металлов НАН Беларуси  
Могилев, Беларусь

В ИТМ НАН Беларуси проводятся исследования по улучшению эксплуатационных свойств антифрикционных силуминов, полученных из вторичных шихтовых материалов, в том числе с повышенным содержанием железа. Железо является наиболее вредной из регламентированных примесей в силуминах, т. к. снижает литейные, прочностные и пластические свойства сплава. Кроме отрицательного воздействия на алюминиевые сплавы, железо также повышает твердость, жаропрочность и износостойкость.

Заготовки из антифрикционного силумина с повышенным содержанием железа (ЖАС-2) были получены литьем в интенсивно охлаждаемую стальную литейную форму с вибрацией и последующей термической обработкой (закалка + искусственное старение). Опытный образец для испытаний имел следующий химический состав: Al – 79,04 %; Si – 13,70 %; Cu – 3,33 %; Fe – 1,70 %; Zn – 0,50 %; Mn – 0,78 %; Cr – 0,6 %; Mg – 0,06 %; остальное – примеси.

Микроструктура опытного образца ЖАС-2 после термической обработки (рис. 1) состояла из единичных включений кристаллов первичного кремния размером 9...10 мкм, округлых кристаллов эвтектического кремния размером 6...8 мкм и дисперсных железосодержащих интерметаллидных включений размером 3...6 мкм. Твердость опытного образца после термической обработки составила 130...138 НВ.

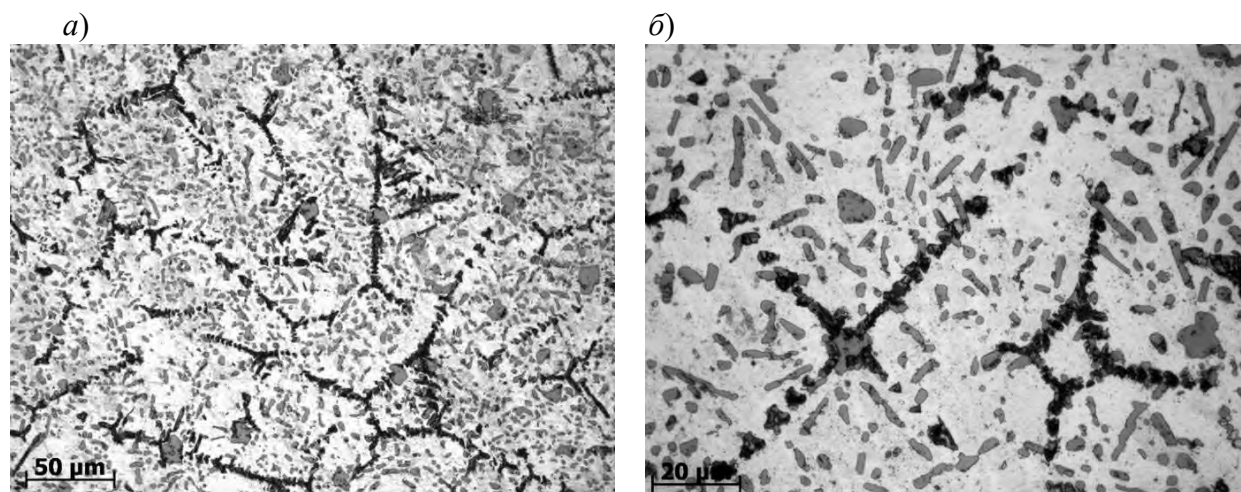


Рис. 1. Микроструктура опытного образца ЖАС-2: *a* –  $\times 200$ ; *б* –  $\times 500$

В результате проведенных исследований литейно-вибрационным способом были получены опытные образцы из силумина АК12М3, легированные мар-

ганцем и хромом, а разработанные режимы термообработки позволили повысить их триботехнические и механические свойства.

Для определения целесообразности использования антифрикционного силумина с повышенным содержанием железа в качестве материала подшипников скольжения либо других деталей, работающих в условиях трения, обязательным условием является проведение их промышленных испытаний.

Для ОАО «Лакокраска» (г. Лида, Беларусь) были изготовлены втулки из силумина ЖАС-2 (рис. 2) взамен аналогичных из импортируемого силицированного графита. Втулки были установлены в центробежный насос ALLWEILER СТWH 100-250/11 U3.3A-K1-W110 циркуляции масла-теплоносителя на позиции 38 «Б» для перекачки «холодного» масла с рабочей температурой 70 °С. Производственные испытания проводились в цехе № 2 по производству фталевого ангидрида в период с мая по ноябрь 2023 г.

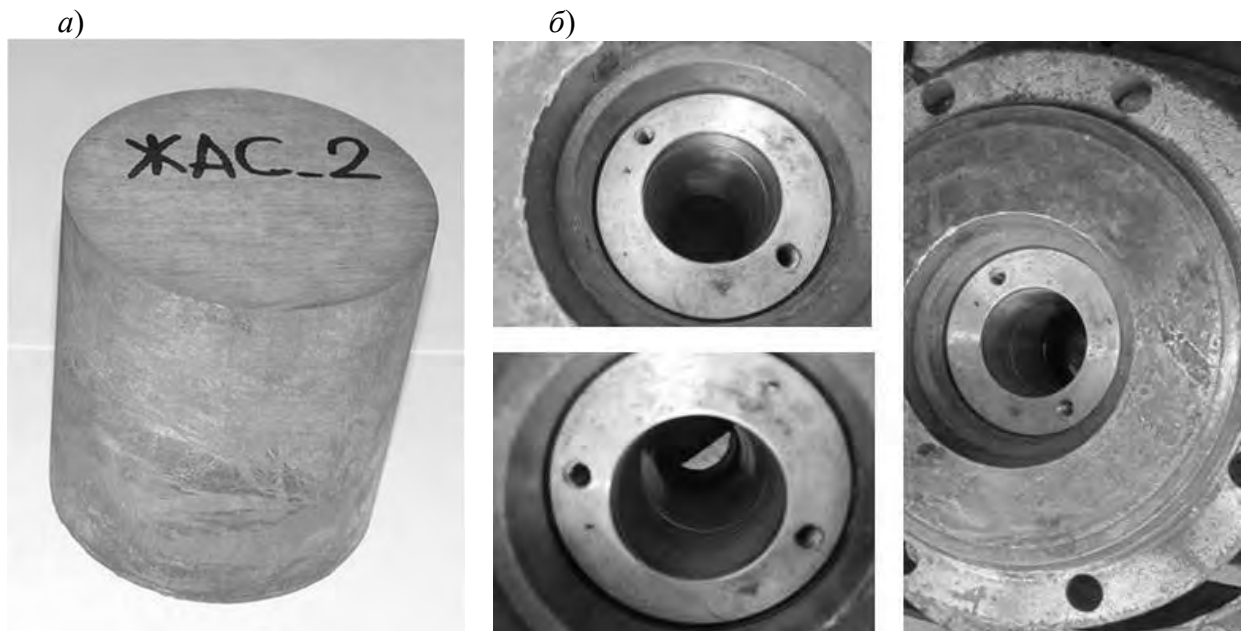


Рис. 2. Литая заготовка (а) и втулка из ЖАС-2 в центробежном насосе (б)

В заключении акта производственных испытаний отражено, что за время эксплуатации оборудования сбоев в его работе зафиксировано не было. Показатели вибрации находились в допустимых значениях. Повышенного нагрева и посторонних шумов не выявлено.

Таким образом, антифрикционный силумин с повышенным содержанием железа марки ЖАС-2, полученный по технологии ИТМ НАН Беларуси, успешно прошел испытания в условиях действующего производства в качестве материала осевых втулок скольжения в насосах циркуляции теплоносителей. По предварительным оценкам ОАО «Лакокраска», экономический эффект от замены импортных втулок из силицированного графита на втулки из ЖАС-2 составляет более 20 000 белорус. р.

УДК 621.9

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МОДУЛЬНОЙ КИСТИ РУКИ-МАНИПУЛЯТОРА

О. В. БЛАГОДАРНАЯ, О. А. ПОНОМАРЕВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь.

Для правильного повторения всех необходимых видов захватов руки-манипулятора нужно правильно задавать кинематику пальцев и кисти.

Зная зависимости углов  $\alpha$  и  $\gamma$  от положения гайки, восстановлены траектории каждого сустава кисти:

$$\begin{cases} x_1 = \cos(\pi - \alpha - \lambda_2) b_2; \\ y_1 = \sin(\pi - \alpha - \lambda_2) b_2; \\ x_2 = x_1 + \cos(2\pi - \alpha - \gamma - \gamma_2 - \gamma_3) c_1; \\ y_2 = y_1 + \sin(2\pi - \alpha - \gamma - \gamma_2 - \gamma_3) c_1; \\ x_3 = x_2 + \cos(3\pi - \alpha - \gamma - \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4) c_2; \\ y_3 = y_2 + \sin(3\pi - \alpha - \gamma - \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4) c_2. \end{cases}$$

Здесь  $(x_1; y_1)$  – координаты первого сустава;  $(x_2; y_2)$  – координаты второго сустава;  $(x_3; y_3)$  – координаты кончика пальца.

Программа, разработанная на языке программирования JavaScript, языке гипертекстовой разметки HTML и каскадной таблицы стилей CSS, позволяет выполнить анимацию и получить траектории всех суставов и кончика пальца при движении (рис. 1).



Рис. 1. Интерфейс программы

3D-модель, разработанная в соответствии с учетом рассчитанных кинематических параметров и траекторий движений, служит для лучшей визуализации и наблюдения за возможными движениями и операциями.

УДК 621.01:624.04

## ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОПОР НА ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЗЕРКАЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА

С. А. ВИДЮШЕНКОВ

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия

Некоторые элементы конструкций зеркал радиотелескопов представляют собой пластинки и оболочки, расположенные на точечных опорах. Так, поверхности зеркал больших диаметров в плане (25...100 м) набираются из отдельных элементов – фасет, выполненных в виде фрагмента оболочки вращения с малой стрелой подъема, расположенной на точечных опорах, с помощью которых можно регулировать положение фасеты в пространстве. Обычно опоры устанавливаются на равных расстояниях от центра фасеты, а свободно деформирующийся наружный контур фасеты позволяет рассматривать ее как пологую оболочку вращения или, из-за ее малых размеров в плане, как круглую пластинку, расположенную на точечных опорах.

Таким образом, при определении температурных и весовых деформаций фасет могут быть использованы разрешающие дифференциальные уравнения пологих оболочек вращения или круглых пластин. При этом общее решение исходного дифференциального уравнения в частных производных, в силу периодичности конструкции по окружной координате, можно представить в виде суммы решений обыкновенных дифференциальных уравнений, соответствующих осесимметричным и циклически симметричным (несимметричным) составляющим деформации срединной поверхности пластины или оболочки [1].

Так как опоры фасет расположены на одинаковых расстояниях от ее центра и равноудалены друг от друга, ряд, определяющий суммарный прогиб фасеты, будет содержать несимметричные гармоники, кратные количеству опор. Поэтому прогиб фасеты может быть представлен в виде ряда

$$w(r, \varphi) = w_0(r) + \sum_{m=1}^{\infty} w_{kN}(r) \cos kN\varphi, \quad (1)$$

где  $w_0(r)$  – осесимметричная составляющая прогиба;  $w_{kN}(r)$  – циклически симметричная составляющая прогиба;  $N$  – количество точечных опор;  $r, \varphi$  – радиальная и окружная координаты точек срединной поверхности пластины или оболочки.

Для определения составляющих прогиба, образующих ряд (1), используются дифференциальные уравнения четвертого порядка пологой оболочки вращения или круглой пластины относительно радиальной координаты  $r$ , которые можно представить в следующей операторной форме [2, 3]:

$$L_m^4(\psi_m) = g_m + L_m^2(M_{tm}), \quad (m = 0, N, 2N, \dots). \quad (2)$$

Так как фасета расположена на точечных опорах, наряду с обычными и кинематическими граничными условиями задачи для определения несимметричной составляющей прогиба необходимо также учесть условие равенства нулю прогиба на опорах, что достигается общим смещением фасеты на величину  $w_m(b)$ , где  $b$  – радиус опорного контура фасеты.

Анализ результатов решения дифференциальных уравнений (2) показывает, что при большом количестве опор несимметричные составляющие прогиба ( $m = kN$ ) мало сказываются на общей величине прогиба фасеты. Однако при малом количестве опор ( $N = 3 \dots 5$ ) на суммарную величину деформаций фасеты наряду с осесимметричной составляющей влияние оказывают лишь несимметричные составляющие с малыми показателями  $m$  ( $m = N, 2N$ ).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Видюшенков, С. А.** Использование разрывных функций при расчете элементов строительных конструкций / С. А. Видюшенков // Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века: сб. материалов I Междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2018. – С. 151–157.
2. **Видюшенков, С. А.** Применение разрывных функций при расчете элементов строительных конструкций / С. А. Видюшенков, А. В. Федосов, Н. Ю. Сойту // Актуальные проблемы строительства: материалы 71 Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 4–6 апр. 2018 г.: в 3 ч. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2018. – Ч. 3. – С. 9–14.
3. Применение математической теории обобщенных функций к расчету пластин и оболочек с разрывными жесткостными и грузовыми характеристиками / С. А. Видюшенков [и др.] // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: материалы VII Междунар. конф. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 1999. – С. 157–160.



УДК 621.01:624.04

## О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ АНТЕНН РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

С. А. ВИДЮШЕНКОВ, И. М. АСТАФЬЕВ

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия

Многие элементы конструкций приемных антенн радиотелескопов и в первую очередь их зеркала представляют собой фрагменты пространственных конструкций, выполненных в виде пластин и оболочек. Так, например, металлоконструкция зеркала обычно выполняется в виде оболочки вращения переменной толщины, а в отдельных случаях и кривизна зеркала имеет переменные характеристики.

Если поверхность больших зеркал состоит из фасет, то каждую такую фасету приближенно можно рассматривать как плоскую пластинку.

Вследствие неравномерного нагрева металлоконструкции зеркала, вызванного действием различных тепловых источников [1], происходит изменение формы его поверхности, что может привести к нарушению условий работы радиотелескопа в требуемом радиоволновом диапазоне.

На положение антенны в пространстве существенное влияние оказывают деформации опорно-поворотной системы антенны радиотелескопа, основные элементы которой можно представить как круглые пластинки на точечных опорах.

Из сказанного следует, что для элементов конструкций антенн радиотелескопов, оказывающих наибольшее влияние на их эксплуатационные качества, необходимо определять температурные и силовые деформации, используя математический аппарат теории пластин и оболочек [1–3].

Для определения температурных и силовых деформаций антенн с поверхностью зеркала, неразрезанной на отдельные элементы, необходимо использовать дифференциальные уравнения оболочки вращения с жесткостными характеристиками, меняющимися в радиальном направлении.

Поскольку конструкции зеркал и фасет представляют собой оболочки и пластинки, замкнутые в окружном направлении, то все функции, определяющие их деформационные характеристики, являются периодическими относительно окружной координаты  $\varphi$ . Поэтому исходные дифференциальные уравнения, используемые при исследовании температурных и силовых деформаций антенн,

могут быть сведены к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно радиальной координаты  $r$ .

Для их эффективного решения целесообразно использовать аналитические методы. Преимущество этих методов перед широко применяемыми в настоящее время численными методами состоит в резком уменьшении объема вычислительных операций и возможности строгого обоснования достоверности получаемых решений.

Данные методы основаны на представлении левой части исследуемого дифференциального уравнения в виде единого дифференциального оператора.

Для аналитического представления нагрузки, распределенной по части поверхности конструкции, в правую часть дифференциального уравнения вводится единичная функция  $H[\varphi - \varphi(r)]$ , где  $\varphi(r)$  – уравнение кривой, отделяющей загруженную часть поверхности пластинки от свободной.

Если же в точке с координатами  $r = r_0$ ,  $\varphi = \varphi_0$  приложена сосредоточенная сила  $F$ , ее аналитическая форма записи имеет вид  $F \cdot \delta(r - r_0, \varphi - \varphi_0)$ . Аналогично, используя дельта-функцию и ее производные, можно аналитически представить точечное воздействие любой другой физической природы.

В совокупности с методом представления левой части исходного дифференциального уравнения в виде единого дифференциального оператора это позволяет находить аналитические решения для широкого класса задач теории пластин и оболочек непосредственным интегрированием.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Видюшенков, С. А.** О температурных деформациях круглой пластинки, расположенной на точечных опорах / С. А. Видюшенков // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: материалы VII Междунар. конф. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2017. – С. 24–25.
2. **Видюшенков, С. А.** Температурные деформации круглой пластинки, расположенной на точечных опорах / С. А. Видюшенков // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сб. тр. X Междунар. конф. по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2018. – С. 57–62.
3. **Козьминская, О. В.** Температурные деформации пластинки с наружным опорным контуром произвольной формы от действия температуры, меняющейся по толщине пластинки / С. А. Видюшенков, Е. В. Соколов, О. В. Козьминская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2007. – Вып. 3 (12). – С. 113–117.

УДК 622.788.36.012(043.2)

## РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ В БАРАБАННОМ ГРАНУЛЯТОРЕ

Н. А. ВЫСОЦКАЯ<sup>1</sup>, В. С. ФРАНЦКЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения  
с Опытным производством»

Солигорск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

Процесс гранулирования представляет собой комплекс физико-химических процессов, обеспечивающих получение частиц заданной формы, размеров и прочности и сопровождающихся уплотнением структуры вещества. Одним из методов гранулирования является гранулирование методом окатывания. Методика представляет собой формирование гранул в присутствии жидкой фазы, которая вносится с твердыми компонентами или специально вводится в виде растворов и плавов. Основным оборудованием, служащим для гранулирования методом окатывания, является барабанный гранулятор [1, 2].

При вращении барабана на частицу, находящуюся на открытой поверхности сегмента материала, действуют гравитационные и центробежные силы. Немаловажными параметрами в процессе окатывания являются время движения частицы и ускорение движения частицы. В процессе вращения в барабане частица находится в различных положениях [3]. Вначале частица находится в углу, в котором начинается ее движение, и это является ее наименее выгодным положением, где она только набирает разгон. В дальнейшем, с увеличением коэффициента внутреннего трения, угол начала движения частиц увеличивается, а также возрастает скорость самой частицы. Чтобы рассчитать процесс прохождения частицы в барабане, учитывают такие параметры, как время движения частицы на участке разгона и ускорение движения частицы.

Время движения частицы на участке разгона определяется по формуле

$$\tau_{pi} = \frac{\omega R_c}{a} + \sqrt{\left(\frac{\omega R_c}{a}\right)^2 + \frac{2}{a} \sqrt{R_c^2 - R_i^2}}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость;  $R_c$  – радиус центра циркуляции частицы, при котором на тяжелые частицы воздействуют силы поперечной циркуляции частицы, перемещающейся в центр вращения (принимается равным 1,9 м);  $a$  – ускорение движения частицы;  $v$  – скорость движения частицы;  $R_i$  – радиус, на котором находится точка перехода частицы из поднимающегося слоя в скатывающийся (принимается равным 1,25 м).

В свою очередь ускорение движения частицы  $a$  находится из уравнения

$$a = \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

Скорость движения частицы  $v$  определяется из выражения  $v = 2\pi R \cdot n$ .  
Угловая скорость  $\omega$  вычисляется как

$$\omega = 2\pi R n. \quad (3)$$



Рис. 1. Барабанный гранулятор

Для расчета барабанного гранулятора производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» с радиусом  $R_i = 1,5$  м и частотой вращения  $n = 8$  об/мин  $= 0,13$  с<sup>-1</sup> рассчитаем вышепредставленные параметры.

Скорость движения частицы получим, подставив в выражение (3) числовые значения:

$$v = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 0,13 = 1,22 \text{ м/с.}$$

Тогда ускорение движения частицы для различных скоростей частицы из уравнения (2)

$$a_1 = \frac{1,22^2}{1,5} = 0,99 \text{ м/с}^2.$$

Зная все неизвестные, найдем ускорения движения частиц:

$$\tau_{pil} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,13 \cdot 1,9}{0,99} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,13 \cdot 1,9}{0,99}\right)^2 + \frac{2}{0,99} \sqrt{1,9^2 - 1,25^2}} = 4,14 \text{ с.}$$

Из полученных значений можно сделать вывод, что с увеличением ускорения движения частиц время движения падает, что логично, т. к. с увеличением скорости для прохождения одного и того же расстояния необходимо затратить меньше времени.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прушак, В. Я. Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» / В. Я. Прушак, Н. Ю. Кондратчик, Н. А. Высоцкая // Тр. БГТУ. – 2020. – Сер. 2, № 1. – С. 62–67.
2. Высоцкая, Н. А. Особенности получения NPK-удобрений методом окатывания / Н. А. Высоцкая, В. С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 79–85.
3. Леонов, Ф. Н. Эффективность минеральных удобрений в зависимости от обеспеченности подвижными фосфатами дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Ф. Н. Леонов, Т. Г. Синевиц // Почвоведение и агрохимия. – 2017. – № 1 (58). – С. 109–116.

УДК 622.625.24:531.36(043.2)

## РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ШАХТНОЙ ВАГОНЕТКИ

Д. В. ГРИДЮШКО<sup>1</sup>, А. А. ХОЛОД<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО «Завод Бургормаш»<sup>2</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения

с Опытным производством»

Солигорск, Беларусь

Вагонетка шахтная – небольшой вагон, которым узкоколейными путями перевозят на небольшое расстояние грузы, а иногда и людей [1]. Она используется для работы на карьерах, заводах, в шахтах. По назначению вагонетки подразделяют на:

- грузовые;
- пассажирские;
- специальные [2].

Грузовая вагонетка состоит из кузова, рамы, скатов, буферов и сцепных устройств и предназначена для перевозки грузов. Пассажирские вагонетки используют для перевозки людей горизонтальными или наклонными подземными горными выработками. Специальные вагонетки применяют в противопожарных подземных поездах, для перевозки взрывчатки, вспомогательных материалов и пр.

Одним из важнейших показателей конструктивного совершенства вагонеток является их устойчивость, которая характеризуется коэффициентом устойчивости. Этот коэффициент равен отношению восстанавливающего момента к максимальному опрокидывающему и находится по формуле

$$K_c = \frac{M_\epsilon}{M_n}, \quad (1)$$

где  $M_\epsilon$  – восстанавливающий момент;  $M_n$  – опрокидывающий момент.

Различают два вида устойчивости вагонетки:

- 1) поперечная;
- 2) продольная.

Поперечная устойчивость вагонетки – способность вагонетки удерживаться на рельсах от опрокидывания на бок под воздействием на нее инерционных или других внешних сил. Продольная устойчивость вагонетки – способность вагонетки удерживаться на рельсах от опрокидывания вперед или назад при действии на нее силы тяжести, инерционных или других сил.

Поперечная устойчивость определяется при движении вагонетки по радиусу, при этом на вагонетку действует центробежная сила, стремящаяся ее выкинуть, и создается этой силой опрокидывающий момент, который находится по формуле [3]

$$M_0 = \frac{Gv^2h'}{gR}, \quad (2)$$

где  $G$  – центробежная сила;  $v$  – скорость движения;  $h'$  – высота расположения центра тяжести вагонетки над уровнем головки рельса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – радиус закругления траектории.

Коэффициент поперечной устойчивости должен быть не менее 1,5 и определяется по формуле

$$k_n = \frac{LgR}{2v^2h'}, \quad (3)$$

где  $L$  – ширина колесной колеи.

Продольная устойчивость определяется при движении вагонетки вниз по рельсовому пути под действием инерционной силы и этой силой создается момент, который находится по формуле

$$M_0 = G \left( \sin \beta + \frac{a}{g} \right) h, \quad (4)$$

где  $a$  – ускорение;  $h$  – высота центра тяжести вагонетки над осями полускатов.

Отсюда следует, что чем ниже центр тяжести вагонетки и чем шире колея, тем больше устойчивость вагонетки.

Опасность потери устойчивости возникает при движении вагонетки по закруглениях, путях со значительным уклоном, при неравномерной одно-сторонней загрузке вагонетки, а также при резкой ее остановке.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагонетки – незаменимое шахтное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vk.tula.su/19/06/2020/59023/vagonetki-nezamenimoe-shaxtnoe-oborudovanie.html>. – Дата доступа: 24.01.2024.
2. Вагонетка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://goo.su/94pQfzI>. – Дата доступа: 24.01.2024.
3. **Штокман, И. Г.** Расчет и конструирование горных транспортных машин и комплексов / И. Г. Штокман. – Москва: Недра, 1975. – 463 с.

УДК 62.833.68

ОБ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОРЫВНЫХ РАЗРАБОТОК  
ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧА. М. ДАНЬКОВ<sup>1</sup>, Ю. В. ГОНЧАРОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусско-Российский университет<sup>2</sup>Могилевский институт МВД Республики Беларусь  
Могилев, Беларусь

Под прорывной разработкой понимают инновацию в данной области, кардинально меняющую сложившийся в ней рыночный уклад и технологическую цепь создания характерной для нее продукции благодаря уникальности или превосходству созданного продукта.

Начало первой такой разработке положил швейцарский инженер Рудольф Эгг в 1895 г., который использовал в автомобильной трансмиссии ременную передачу с раздвижными шкивами. Технический мир потерял интерес к ней из-за присущих ей недостатков. Возобновил интерес к идее голландец Хуберт ван Дорн, успешно использовавший в 1958 г. клиноременный вариатор в трансмиссии автомобиля DAF Daffodil, причем сумел применить для регулирования передаточного отношения вариатора педаль газа. Основным достоинством вариатора, привлекающим внимание создателей автомобилей, является возможность плавно реализовать с его помощью бесконечное множество передаточных отношений, в то время как трансмиссии других типов реализуют 6–7 (в лучшем случае 9) передаточных отношений. Но этот вариатор не смог вытеснить современные ему механические и автоматические коробки передач из-за низкой надежности, обусловленной материалом ремней – резиной. Проблема была решена в 80-х гг. прошлого века, когда был предложен составной металлический ремень, собранный из металлических элементов и работающий на сжатие. Но только в 2004 г. в автомобилестроении состоялся «вариаторный бум», потому что только к этому времени в трансмиссиях с вариатором усилиями автомобильных фирм и инженеров были достигнуты приемлемые значения показателей расхода топлива и передаваемой мощности благодаря таким созданным отличительным особенностям, как фрагментация ремня с последующей заменой его цепью и перевод управления трансмиссией на гидроавтоматику и электронику.

Благодаря тому, что в последнее время разработаны новейшие пакеты прикладных математических программ, обеспечивающие математическое моделирование сложных технических систем для передачи движения, а также получили развитие оборудование и технологии металлообрабатывающей отрасли, стало возможным не только создавать их математические модели, но и изготавливать их макеты. Так, в 2007 г. в Томске было создано эксцентриково-циклоидальное зацепление, в котором, как и в классическом планетарно-цевочном (цевочном, по В. К. Кудрявцеву) зацеплении, основой передачи движения, если рассматривать плоскую картину, является взаимодействие окружности и циклоиды, в отличие от эвольвентного зацепления, в котором взаимодействуют две эвольвенты.

Передача с ЭЦ-зацеплением может быть реализована в двух вариантах:

1) зубчатые колеса могут быть выполнены составными из тонких пластин, причем колесо – циклоидальных, а шестерня – цилиндрических, эксцентрично повернутых на ведущем валу;

2) колесо – косозубое циклоидальное, шестерня – в виде сопряженного с колесом винтового эксцентрика.

Пришли к выводу, что передача с ЭЦ-зацеплением способна, по сравнению с эвольвентной, обеспечить: повышенные передаточное отношение и контактную прочность; меньшие габариты при одинаковой нагрузочной способности (повышенную нагрузочную способность при одинаковых габаритах); более высокие ресурс, надежность и КПД более 98 %; более низкую виброактивность; снижение себестоимости в 1,5–2 раза за счет экономии металла и энергоресурсов при производстве. Повышенное передаточное отношение объясняется предельно малым числом зубьев шестерни, что требует больших углов наклона зубьев колеса (до  $45^\circ$ ). Среди отличительных особенностей передачи, по сравнению с планетарно-цевочной, следует выделить ее «непланетарное» исполнение (радиус водила реализован в ведущем элементе) и созданный прецедент использования косозубого циклоидального колеса.

К ряду упомянутых разработок можно причислить разработку нескольких отражающих пройденный путь развития модификаций двухколесной планетарной плавнорегулируемой передачи К-Н-V. Перспективная передача по этой схеме должна иметь противоположное устройство, исключающее вращение сателлита вокруг собственной оси и значительно усложняющее конструкцию передачи. Следует отметить, что стремление упростить конструкцию и повысить конкурентоспособность передачи обусловило необходимость остановиться в итоге на схеме 2К-Н с двухвенцовым (в основном варианте) сателлитом. Основой всех модификаций этой передачи с разделяющимся силовым потоком являются составное полисекторное зубчатое колесо, в форме которого выполняется центральное зубчатое колесо, и двухпоточный циклоидальный сателлит. Зубчатая плавнорегулируемая передача в рядовом исполнении имеет три легко реализуемых режима работы: редукция, единичное преобразование и мультипликация. Предварительные исследования кинематики передачи по схеме 2К-Н показывают возможность реализации в ней режимов редукции и мультипликации. Отличительными особенностями этой передачи являются фрагментация зубчатого венца центрального колеса, обеспечивающая изменение его геометрии, и переход от геометрического замыкания элементов передачи к силовому, упрощающему кинематическую цепь механизму регулирования передаточного отношения.

Необходимо отметить, что упомянутые разработки имеют общие отличительные особенности: фрагментацию элементов – клиноремный вариатор и плавнорегулируемая передача; использование циклоидального зацепления – ЭЦ-передача и плавнорегулируемая передача. Даже неполное представление об описанных разработках позволяет сделать вывод о желательности (при наличии возможностей!) использования в плавнорегулируемой передаче гидроавтоматики и электроники, а также косозубого циклоидально-цевочного зацепления.



УДК 622.647.2.058.2(043.2)

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАТЯЖНОГО УСТРОЙСТВА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Ю. В. КАЛИНЦЕВ, А. В. БРИЖЕВИЧ

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения

с Опытным производством»

Солигорск, Беларусь

В настоящее время наиболее эффективным и высокопроизводительным видом конвейерного транспорта являются ленточные конвейеры [1]. Их использование в шахтах позволяет концентрировать горные работы, повышать нагрузки на забой и многое другое. Эффективность работоспособности ленточных конвейеров во многом зависит от технического состояния ленты.

Так, для поддержания минимального натяжения ленты и для уменьшения ее провисания между роlikоопорами используют натяжные устройства. С помощью натяжного устройства ленте сообщается определенное натяжение, которое создает тяговое усилие на приводном барабане за счет силы трения, возникающей между лентой и поверхностью барабана [2]. По принципу действия натяжные устройства делятся на грузовые, лебедочные и грузолебедочные.

Грузовое натяжное устройство состоит из натяжного барабана, перемещающегося по рельсам тележки [3]. Его особенность заключается в постоянстве натяжения ленты как при пуске, так и в процессе работы конвейера. Работоспособность грузового натяжного устройства обозначается символом  $\Pi$  и находится по формуле

$$\Pi = Qh, \quad (1)$$

где  $Q$  – потенциальная энергия;  $h$  – высота.

Динамическая работоспособность грузового натяжного устройства несколько меньше статической и определяется инерционностью груза и конструктивным исполнителем. Недостатком таких натяжных устройств является необходимость наличия значительной по высоте шахты для перемещения груза [4].

Лебедочные натяжные устройства создают натяжения с помощью грузовых лебедок. Работоспособность лебедочного натяжного устройства находится по формуле

$$\Pi = \frac{1}{2} \Delta L S_n, \quad (2)$$

где  $\Delta L$  – упругое удлинение;  $S_n$  – натяжение.

Статистическая работоспособность лебедочного натяжного устройства ограничена только ходом натяжного барабана, а динамическая работоспособность примерно равна потенциальной энергии, запасенной в растянутой ленте. Основными недостатками данного устройства являются запаздывание реагирования привода лебедки на изменение режима работы конвейера и большое различие величины динамической работоспособности от статистической.

В связи с недостатками грузовых и лебедочных устройств большое распространение получили грузолебедочные натяжные устройства. В них постоянное натяжение создается весом груза, величина перемещения которого невелика, а излишки троса, образующиеся при больших перемещениях натяжного барабана, убираются лебедкой. Работоспособность грузолебедочного натяжного устройства находится по формуле

$$P = \Delta l P, \quad (3)$$

где  $\Delta l$  – длина пути перемещения натяжного барабана;  $P$  – грузоподъемность лебедки.

В результате применения грузолебедочных натяжных устройств не возникает большего различия в значениях динамической и статистической работоспособности, в отличие от статистической и динамической работоспособности, что приводит к минимальной вероятности возникновения перенапряжения в работе устройства.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для обеспечения долговечности работы транспортирующих машин необходимо использовать в работе грузолебедочные натяжные устройства.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захарова, Ю. Н.** Ленточные конвейеры горной промышленности: исследование и проектирование / Ю. Н. Захарова. – Гродно: Гродн. гос. аграр. ун-т, 2013. – 417 с.
2. Натяжное устройство ленточного конвейера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cargo-transfer-system.ru/natyazhnoe-ustroystvo.html>. – Дата доступа: 22.01.2024.
3. Натяжные устройства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9753037/page:10/>. – Дата доступа: 22.01.2024.
4. **Котов, М. А.** Оценка работоспособности и метод расчета натяжного устройства для ленточного конвейера / М. А. Котов. – Москва: Недра, 1965. – 325 с.

УДК 621.83

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВОЗМОЖНЫХ РАБОЧИХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПРЕЦЕССИОННОГО МОТОР-РЕДУКТОРА

Е. Г. КРИВОНОВОГА, Д. С. ГАЛЮЖИН, С. Д. СТАНКЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Приводное устройство, созданное на основе прецессионных редуцирующих механизмов, как любая технически сложная машина состоит из ряда составных частей, деталей, сборочных единиц и стандартных изделий, которые оказывают существенное влияние на выходные кинематические и силовые (прочностные) характеристики. От слаженной совместной работы всех составных элементов зависит работоспособность, надежность и долговечность любого, даже самого простого, устройства.

Применение методов компьютерного моделирования способно на стадии проектирования учесть возникающие погрешности путем выполнения расчета по определению кинематических и силовых показателей редуцирующего механизма и элементов привода. Одним из подобного вида расчетов является расчет основных рабочих соединений привода, таких как шпоночное или шлицевое соединение типа «вал – ступица».

Мотор-редуктор объединяет в одно устройство редуктор и электродвигатель, причем выходной вал электродвигателя является входным валом редуктора.

Мотор-редуктор, на основе любой из возможных структурных схем, может быть выбран в качестве прецессионного редуцирующего механизма для исследования рабочих соединений.

Прежде чем проводить исследование выбранного мотор-редуктора, необходимо подтвердить возможность применения классической методики расчета шпоночных и шлицевых соединений аналитическим методом и выявить сходимость данных, полученных аналитически и с помощью систем компьютерного моделирования, на примере расчета простых конструкций [1]. Для компьютерного моделирования и последующего расчета использовались программные продукты КОМПАС-3D и SolidWorks.

Далее будет представлен результат расчета рабочего соединения типа «вал – ступица» призматической шпонкой.

Основной функцией шпонки является передача крутящего момента между узлами. Крутящий момент передается с вала на ступицу боковыми гранями шпонки. При этом возникают напряжения смятия  $\sigma_{см}$ , а в продольном сечении шпонки – напряжения среза  $\tau_{ср}$ . Условие прочности на срез в продольном сечении стандартных шпонок обеспечивается выбором размеров  $b \times h$ . При решении проектной задачи соответствующая проверка не требуется. Проверяют шпонки только по напряжениям смятия [2].

Схема сил, действующих на шпонку, и результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1.

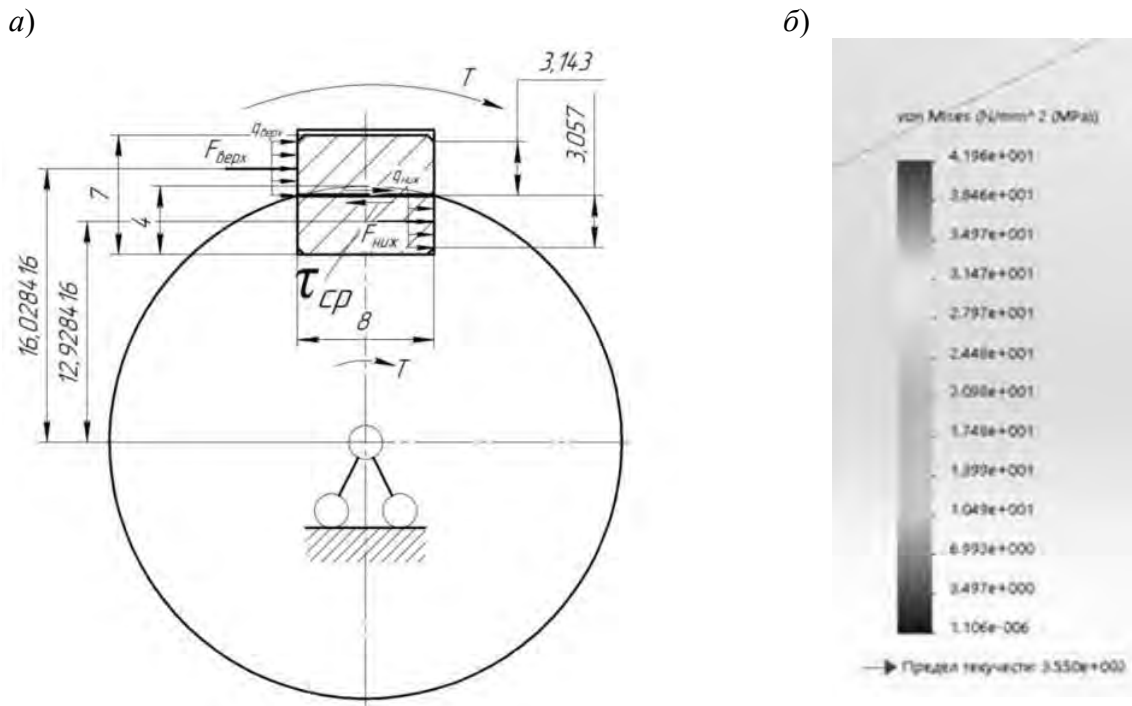


Рис. 1. Схема сил, действующих на шпонку, и результаты компьютерного моделирования

В результате аналитического расчета определены следующие параметры:  $F_{\text{верх}} = 4283,6$  Н;  $F_{\text{ниж}} = 5310,7047$  Н;  $A = 113,11$  мм<sup>2</sup>. Так как передаваемый момент одинаковый, расчет будем проводить по  $F_{\text{ниж}} = 5310,7047$  Н. Напряжение смятия определяем из условия прочности при растяжении-сжатии:

$$\sigma_{\text{см}}^a = \frac{F}{A} = \frac{5310,7}{113,1} = 46,95 \text{ МПа.} \quad (1)$$

Погрешность расчетов аналитическим методом и с помощью компьютерного моделирования составляет:

$$\Delta = \frac{\sigma_{\text{см}}^a - \sigma_{\text{см}}^k}{\sigma_{\text{см}}^a} = \frac{46,95 - 41,96}{46,95} \cdot 100 \% = 10,63 \% \text{ МПа.} \quad (2)$$

Сходимость 10,632 % была получена при размере сетки 0,5 мм. Учитывая тенденцию сближения с аналитикой, считаем данный метод анализа применимым к расчету подобного рода соединений.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Практикум по основам проектирования и деталям машин: учебное пособие / М. Е. Лустенков. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 203 с. : ил.
2. **Подскребко, М. Д.** Сопротивление материалов. Основы теории упругости, пластичности, ползучести и механики разрушения: учебное пособие для вузов / М. Д. Подскребко. – Минск: Вышэйшая школа, 2009. – 670 с.

УДК 621.83.06

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОИДАЛЬНО-ЦЕВОЧНЫХ ПЕРЕДАЧ (СХЕМА К-Н-V)

М. Е. ЛУСТЕНКОВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Циклоидально-цевочные планетарные передачи превосходят передачи с эвольвентным зацеплением по КПД и имеют возможность обеспечить разницу числа зубьев циклоидального и цевочного колес, равную единице. Выпуск редукторов с циклоидально-цевочным зацеплением за рубежом налажен фирмами Onvio, Nides, Sumitomo, Spinea. В Республике Беларусь данный тип редукторной техники разрабатывают ЗАО «Белробот» и ОАО «Приборостроительный завод Оптрон». Высокие технические характеристики могут обеспечить планетарные передачи с внецентроидным зацеплением, у которых колеса с циклоидальными зубьями изготовлены по центральному профилю в виде укороченной эпициклоиды. При оптимизации параметров зацепления одноступенчатой передачи, спроектированной по схеме  $k-h-v$ , по критерию максимального КПД считаем заданными модуль передаточного отношения  $u$  и радиус окружности расположения осей цевок  $R_b$ , ограничивающий радиальные габариты передачи. Управляемыми параметрами являются эксцентриситет установки сателлита  $A$  и коэффициент укорочения эпициклоиды  $\lambda$ . Оптимизацию проводят путем поиска максимума функции КПД, зависящего от коэффициента трения в контакте цевок и зубьев, и угла подъема эпициклоиды (дополняющего до значения  $\pi/2$  угол давления). Среднее значение угла подъема можно определить по формуле [1]

$$\alpha_m = \operatorname{arctg} \left( \frac{2 \cdot A \cdot u}{\pi \cdot R_b} \right). \quad (1)$$

Оптимальные значения  $\alpha_m$  определяют по результатам силового анализа с учетом сил трения [2]. Используя зависимость  $R_b = A \cdot u \cdot \lambda^{-1}$ , получим выражение для определения необходимого коэффициента укорочения эпициклоиды

$$\alpha_m = \operatorname{arctg} \left( \frac{2 \cdot \lambda}{\pi} \right). \quad (2)$$

Таким образом, после определения оптимального угла  $\alpha_m$  находим соответствующие значения  $\lambda$  и  $R_b$  и определяем необходимый эксцентриситет  $A$ .

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лустенков, М. Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности: монография / М. Е. Лустенков. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.
2. Лустенков, М. Е. Силовой анализ передач с промежуточными телами качения / М. Е. Лустенков // Изв. вузов. Машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 26–31.

УДК 621.83.06

## УСИЛИТЕЛЬ МОМЕНТА НА ОСНОВЕ ЦИКЛОИДАЛЬНО-ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ

М. Е. ЛУСТЕНКОВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

На основе аналога [1] разработана классификационная схема циклоидально-цевочных передач, спроектированных по схеме  $k-h-v$  [2], с разницей числа цевок и зубьев циклоидального колеса, равной единице. Также разработана методика определения основных параметров при условии ограничения на радиальные габариты редуктора.

Разработан, изготовлен и собран экспериментальный образец циклоидально-цевочного редуктора *Cyclo-80-36* (рис. 1) с двухвенцовым сателлитом, применяемый как усилитель момента для демонтажа и сборки резьбовых соединений. Параметры редуктора: число зубьев неподвижного центрального колеса  $Z_3 = 5$ ; число зубьев колеса, соединенного с ведомым валом,  $Z_2 = 6$ . Разница чисел роликов венцов сателлита  $\Delta Z = 1$ . Числа роликов венцов сателлитов  $Z_{43} = 6$  и  $Z_{42} = 7$  соответственно. Передаточное отношение равно 36. Максимальный диаметр корпуса составляет 80 мм. Длина редуктора, с учетом длин выходных концов валов, равна 78 мм.

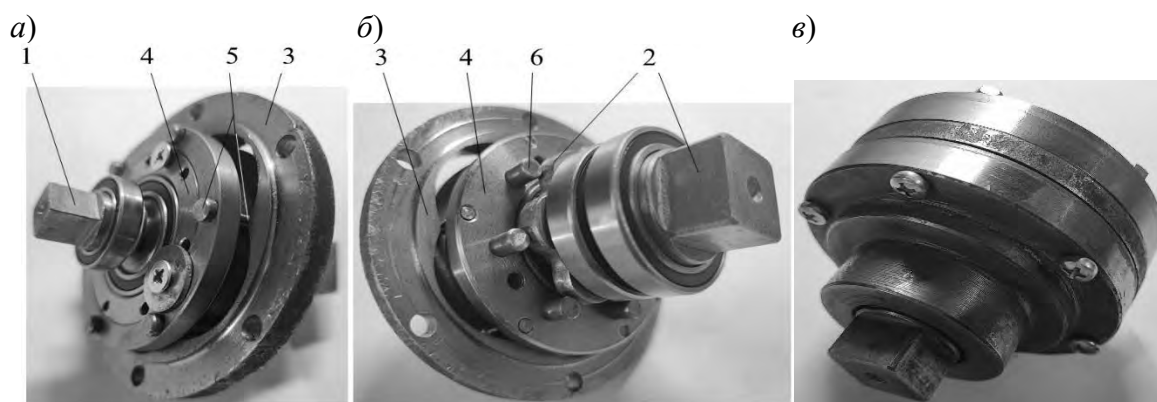


Рис. 1. Первая ступень (а), вторая ступень (б) и циклоидально-цевочный редуктор *Cyclo-80-36* в сборе (в): 1 – ведущий вал; 2 – ведомый вал с центральным циклоидальным колесом; 3 – неподвижное циклоидальное колесо; 4 – двухвенцовый сателлит; 5, 6 – ролики (цевки) двух венцов сателлита

На концах ведущего и ведомого валов усилителя момента изготовлены участки квадратного профиля для использования стандартных накладных головок из комплекта механизированного инструмента.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диняева, Н. С. Конструирование механизмов антенн: учебное пособие / Н. С. Диняева. – Москва: МАИ, 2002. – 340 с.
2. Кудрявцев, В. Н. Планетарные передачи / В. Н. Кудрявцев. – Москва; Ленинград: Машиностроение, 1966. – 307 с.

УДК 621.83.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ КПД ЦИКЛОИДАЛЬНО-ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Е. С. ЛУСТЕНКОВА, С. А. ЗЫЛЬ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В Белорусско-Российском университете разрабатываются редукторные узлы на основе передач с промежуточными телами качения различных типов для электромеханических приводов и механизированного инструмента [1]. В системе Siemens NX была разработана модель циклоидально-цевочной передачи (рис. 1), спроектированная по схеме  $k-h-v$ , и проведены экспериментальные исследования в блоке программы Motion Simulation по определению КПД передачи при ее работе в мультипликаторном режиме [2]. Вал 2, контактирующий с сателлитом с помощью механизма параллельных кривошипов (пальцев), вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega_2 = 2 \cdot \pi / 19$  рад/с. Сателлит 4, обкатываясь по неподвижному цевочному колесу 3, вынуждает эксцентрик (ведомый вал) 1 вращаться с увеличенной скоростью. Передаточное отношение механизма и, соответственно, коэффициент мультипликации при обратном потоке мощности  $i = -19$ . К эксцентрику прилагался постоянный момент сопротивления  $T_1 = 1$  Н·м.

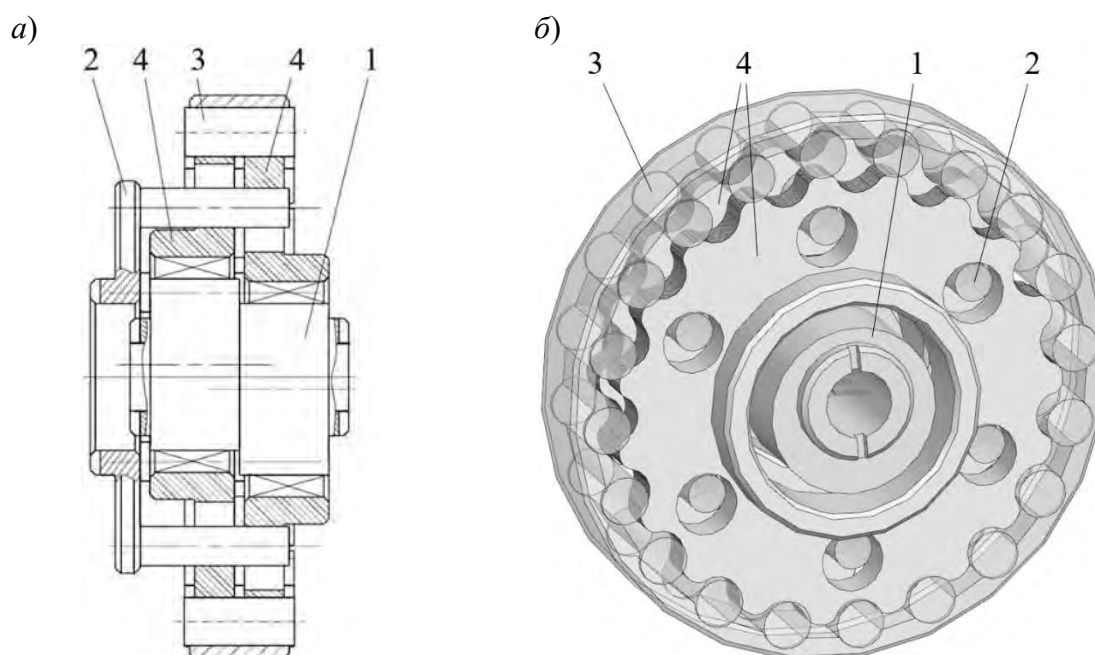


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и общий вид (б) компьютерной модели циклоидально-цевочной передачи: 1 – водило (эксцентрик); 2 – вал с механизмом съема вращения с сателлита; 3 – неподвижное центральное цевочное колесо; 4 – эксцентрик

Сателлит проектировался двоянным для увеличения нагрузочной способности и повышения уравновешенности системы [3]. Для уменьшения влияния параметров жесткости и податливости на характер изменения мгновенных

значений угловых скоростей и моментов применялись следующие параметры: коэффициент жесткости  $c = 10^4$  Н/мм; коэффициент демпфирования  $\mu = 20$  Н·с/мм. Они влияют на амплитуду колебаний значений, но не изменяют среднюю величину момента  $T_2$ .

Допущением модели являлось жесткое закрепление цевок в виде сплошных цилиндров с цевочным колесом. Возможность качения втулок на осях в передаче моделировалось путем изменения (снижения) коэффициента трения скольжения. Трение задавалось только в 3D-контакте между сдвоенным сателлитом и центральным цевочным колесом, т. к. трение в механизме параллельных кривошипов является отдельным вопросом для рассмотрения. В первом случае коэффициент трения скольжения принимался равным 0,1, во втором – 0,05. Коэффициенты сцепления были равны 0,2 и 0,1 соответственно. Скорости перемещения при сцеплении и скольжении принимались по умолчанию 0,01 и 0,1 мм/с в обоих случаях. Результаты показаны на рис. 2.

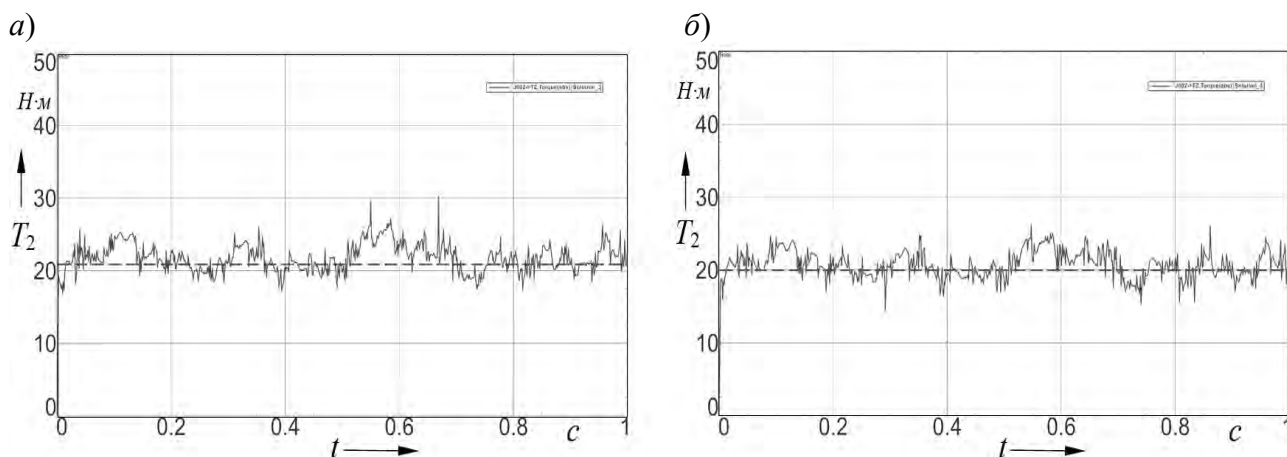


Рис. 2. Результаты моделирования при коэффициентах трения скольжения в зацеплении  $f = 0,1$  (а) и  $f = 0,05$  (б)

При различных коэффициентах трения (0,1 и 0,05) средние значения моментов на входном валу мультипликатора составили 21 и 20 Н·м соответственно, что соответствует КПД передачи 0,90 и 0,95.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лустенков, М. Е.** Ключ для демонтажа ведущих колес грузовых автомобилей ЗИЛ и ГАЗ / М. Е. Лустенков // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 5. – С. 24–25.
2. **Лустенков, М. Е.** Теоретическая оценка коэффициента полезного действия сферической шариковой передачи, работающей в мультипликаторном режиме / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Изв. вузов. Машиностроение. – 2023. – № 8 (761). – С. 32–40.
3. **Lustenkov, M. E.** Analysis of contact strength of spherical roller transmission with double-row pinion / M. E. Lustenkov, A. N. Moiseenko // IOP Conf. Series: International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies (MEMT 2020). – 2021. – Vol. 1118 (2021). – 6 p.



УДК 621.83.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОИДНОГО ЦИКЛОИДАЛЬНО-ЦЕВОЧНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Е. С. ЛУСТЕНКОВА, Ю. В. МАШИН, В. Л. КОМАР, С. А. ЗЫЛЬ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Внутреннее циклоидально-цевочное зацепление является одним из наиболее перспективных для создания мультипликаторных механизмов [1], т. к. обладает высоким КПД и позволяет получать большие передаточные отношения (коэффициенты мультипликации) в одной ступени с низкой материалоемкостью при проектировании передачи по схеме  $k-h-v$ . С учетом того, что у эпициклоидальных передач разница чисел цевок центрального неподвижного колеса  $n$  и зубьев сателлита  $Z$  равна единице ( $n = Z + 1$ ), модуль передаточного отношения будет  $u = Z$ .

Целью исследований было установление связи основных геометрических параметров центроидного циклоидально-цевочного зацепления при заданном передаточном отношении и установленных ограничениях на радиальные габариты мультипликатора. Уравнения эпициклоиды, определяющие профиль зубьев, можно получить путем наружного обкатывания подвижной окружности большего радиуса  $R_b$  по неподвижной окружности с радиусом  $R$  (диаметром  $D = 2 \cdot R$ ). Модель механизма (рис. 1, а) при этом соответствует обращенному планетарному механизму по схеме  $k-h-v$  с остановленным водилом.

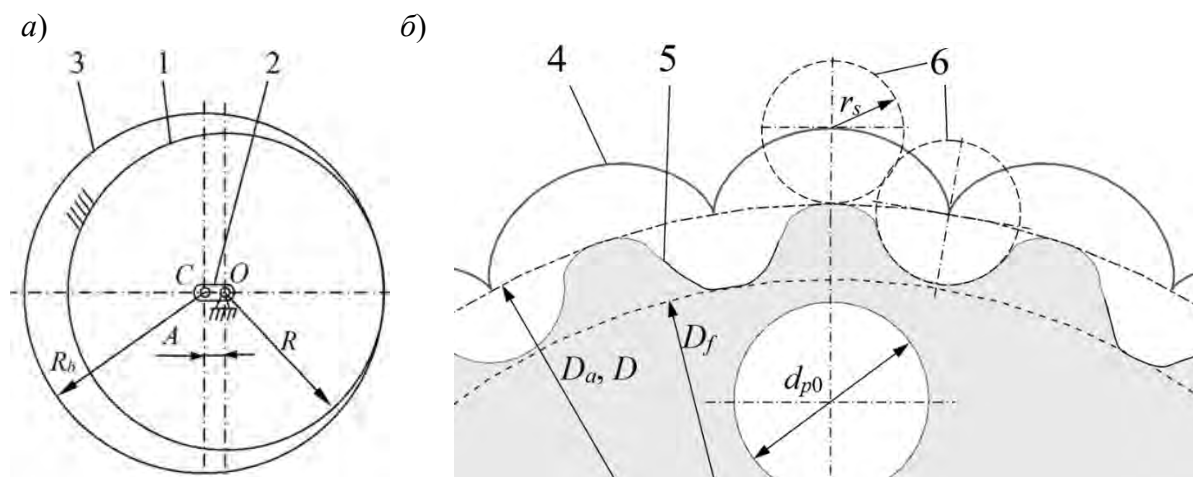


Рис. 1. Схема взаимодействия центроид (а) для формирования циклоидального профиля зубьев (б): 1 – неподвижная окружность (центроида); 2 – условный кривошип; 3 – подвижная окружность (центроида); 4 – эпициклоида (центральной профиль); 5 – циклоидный зубчатый профиль; 6 – цевки (ролики)

На окружности с диаметром  $D_b$  располагаются центры цевок (роликов) на центральном колесе. Радиус окружности  $R$  при заданном диаметре  $D_b$  ( $R_b = 0,5 \cdot D_b$ ) определится из условия  $R_b = R + A$ . При этом  $Z = R/A$ . Поэтому

$$R = 0,5 \cdot D_b - R / Z. \quad (1)$$

После преобразований

$$R = 0,5 \cdot D_b \cdot (1 + u^{-1})^{-1}. \quad (2)$$

Для примера зададим модуль передаточного отношения  $u = 12$  и диаметр расположения центров цевок  $D_b = 80$  мм. В этом случае  $n = 12$ ,  $Z = 11$ ,  $R = 36,667$  мм,  $A = 3,333$  мм. Принцип формирования профиля зубьев показан на рис. 1, б. Он образуется как эквидистанта к центральному профилю, по которому перемещаются центры роликов (цевок) и ось инструмента (цилиндрической фрезы) с радиусом  $r_s$  при изготовлении зубьев на станках с ЧПУ. Совпадение диаметров  $D$  и  $D_a$  на рис. 1, б обусловлено определенным сочетанием параметров, а именно  $r_s = 2 \cdot A$ . Зависимость (2) графически представлена на рис. 2, а.

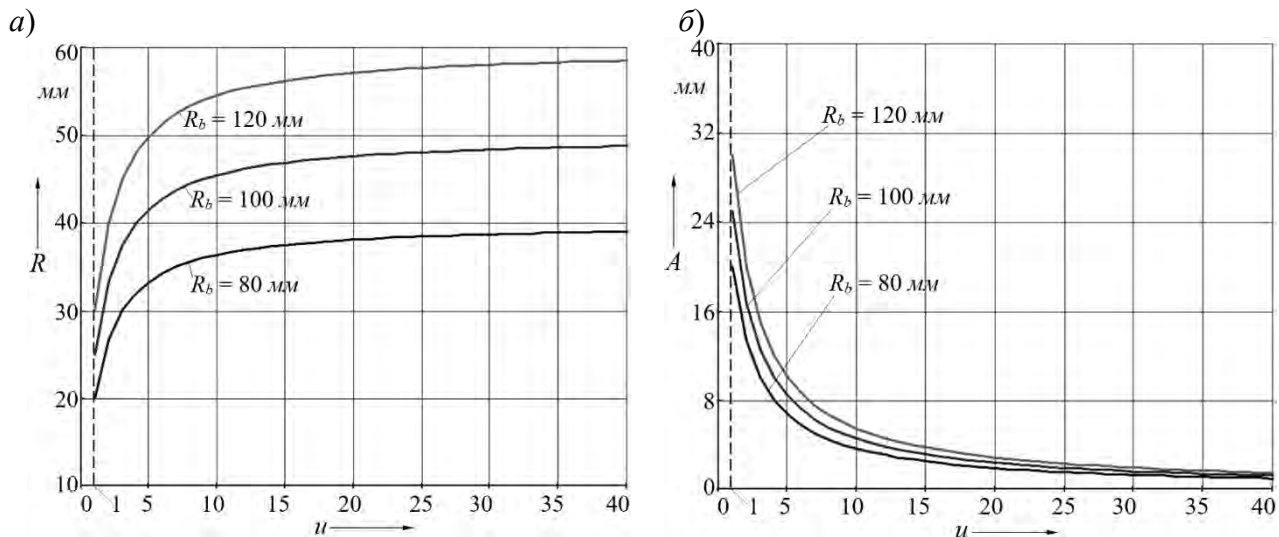


Рис. 2. Зависимость радиуса неподвижной центроиды (а) и эксцентриситета (б) от модуля передаточного отношения

С увеличением передаточного отношения радиус неподвижной центроиды асимптотически приближается к радиусу  $R_b$ , а эксцентриситет  $A$  – к нулю (рис. 2, б). Геометрические параметры  $R$ ,  $A$  и  $r_s$  окончательно должны определяться с учетом обеспечения контактной прочности и минимальных потерь мощности [2].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лустенков, М. Е. Теоретическая оценка коэффициента полезного действия сферической шариковой передачи, работающей в мультипликаторном режиме / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Изв. вузов. Машиностроение. – 2023. – № 8 (761). – С. 32–40.
2. Лустенков, М. Е. Геометрический анализ и теоретическая оценка КПД плоско-конического зацепления сферической роликовой передачи / М. Е. Лустенков, А. Н. Моисеенко // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 6 (18). – С. 32–42.

УДК 621.83.06

## ТОРЦОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

А. П. ПРУДНИКОВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Для передачи вращающего момента с вала на зубчатое колесо чаще всего применяют шпоночные соединения. Их недостатками являются снижение прочности вала вследствие уменьшения площади его поперечного сечения и концентрации напряжений в углах шпоночного паза, необходимость увеличения длины ступицы колеса при передаче больших вращающих моментов.

В качестве альтернативы шпоночному соединению предлагается использовать торцовое разъемное соединение вала и колеса с помощью втулки, установленной с эксцентриситетом в пазе, выполненном на торцовых поверхностях вала и ступицы колеса. Такое соединение, по сравнению со шпоночным, имеет более высокую нагрузочную способность, поскольку передаваемые силы действуют на всей цилиндрической поверхности втулки, и не снижает прочность вала, т. к. паз выполняется на большем диаметре буртика вала и не расположен в опасном сечении вала.

Критерием работоспособности рассматриваемого соединения является прочность. Расчет втулки выполняется по напряжениям среза и смятия.

Напряжения смятия для втулки определяются по формуле

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot T}{a \cdot h_k \cdot D_n},$$

где  $T$  – вращающий момент, передаваемый с вала на зубчатое колесо, Н·м;  $a$  – величина смещения, с которым втулка устанавливается относительно оси вала и колеса, м;  $h_k$  – длина втулки, м;  $D_n$  – диаметр наружной поверхности втулки, м.

Напряжения среза для втулки определяются по формуле

$$\tau_{ср} = \frac{4 \cdot T}{a \cdot \pi \cdot (D_n^2 - D_в^2)},$$

где  $D_в$  – диаметр внутренней поверхности втулки, м.

С помощью метода конечных элементов был выполнен анализ напряженно-деформированного состояния втулки при таком способе соединения, который подтвердил адекватность представленных математических зависимостей.

УДК 621.83.06

## ЭКСЦЕНТРИКОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

А. П. ПРУДНИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Способами передачи вращающего момента с вала без выполнения на нем пазов являются соединение с натягом и клеммовое соединение, что может быть оправдано, когда ослабление прочности вала шпоночным пазом недопустимо или при ремонте оборудования.

Недостатками клеммового соединения являются сложность обеспечения точного центрирования соединения, создаваемый им дисбаланс и значительные габаритные размеры. Соединение с натягом, не обладая данными недостатками, однако сложно для демонтажа при ремонте оборудования, а также может приводить к повреждению поверхности вала при разборке соединения.

В качестве возможной замены указанных способов соединения деталей предлагается использовать эксцентриковое соединение, которое представляет собой следующее: ступица на валу устанавливается на части своей длины по посадке с небольшим натягом, обеспечивающим хорошее центрирование деталей; на оставшейся части длины ступицы отверстие выполнено со смещением  $\Delta$  относительно оси колеса и вала; на валу, в свою очередь, устанавливается эксцентрик, эксцентриситет которого равен  $2 \cdot \Delta$ .

Получена зависимость для расчета момента на эксцентрике, необходимого для создания силы трения в соединении, позволяющей передать требуемый вращающий момент с вала на ступицу.

Критерием работоспособности эксцентрикового соединения является прочность, поэтому эксцентрик необходимо рассчитывать на контактные напряжения, возникающие в месте его взаимодействия со ступицей.

Анализ полученных зависимостей показал, что для снижения требуемого момента поворота эксцентрика и контактных напряжений на его поверхности необходимо минимизировать величину смещения  $\Delta$ , однако при этом будет увеличиваться требуемый угол поворота эксцентрика, который, в свою очередь, ограничен конструкцией соединения и не может превышать  $180^\circ$ .

Адекватность полученных зависимостей была подтверждена в ходе моделирования в САПР SolidWorks Simulation.

К преимуществам предложенного соединения можно отнести следующее: хорошее центрирование деталей; низкая сложность демонтажа соединения; малые габаритные размеры; способность передавать динамические нагрузки. Недостатком эксцентрикового соединения является дополнительная радиальная нагрузка, возникающая при создании соединения и действующая на вал и опоры. Исходя из своих преимуществ и недостатков, предложенное соединение предназначено для передачи небольших вращающих моментов, обеспечивая при этом простой монтаж и демонтаж.

УДК 621.878.6

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ МАШИНОЙ

О. В. ПУЗАНОВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Рабочая машина должна реализовать требуемое движение. Это может быть обеспечено кинематической схемой машины или определенным законом управления двигателем машины. Закон управления легче изменить, чем кинематическую схему, поэтому чаще используют машины с программным управлением. При этом программа управления должна обеспечивать выполнение требуемого движения с определенной точностью.

Оценка эффективности программного управления основана на выполнении динамического анализа машины и включает следующие этапы: формирование математической модели объекта исследования; формирование программы управления объектом; оценка уровня идеализации математической модели объекта исследования; оценка динамических ошибок идеализации; при необходимости, синтез, повышающий точность системы управления, используя дополнительные элементы (конечные выключатели, ограничительные упоры, многоступенчатое позиционирование, замкнутый контур с обратной связью).

Математическая модель динамической системы представляет собой систему дифференциальных уравнений движения в форме уравнений Лагранжа с учетом характеристики двигателя:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i + Q_{ci}; \\ \tau \dot{Q}_i + Q_i = F_{cm}(u, \dot{q}_i), \quad i = 1 \dots n, \end{cases} \quad (1)$$

где  $q_i$  – обобщенная координата подвижности  $i$ ;  $T(q, \dot{q})$  – кинетическая энергия системы;  $Q$  – обобщенная движущая сила;  $Q_c$  – обобщенная сила сопротивления;  $F_{cm}$  – статическая характеристика двигателя;  $\tau$  – собственная постоянная времени, характеризующая инерционность процессов источника энергии;  $u(t)$  – параметр управления двигателя.

Должен быть задан требуемый закон движения выходного звена  $q(t)$ . Тогда, решая задачу кинематики, можно найти закон изменения обобщенной движущей силы и закон программного управления  $u(t)$ . Так, к системе (1) добавляются уравнения программного управления  $u_i(t)$  с учетом способа управления. Для программного управления

$$u(t) = s \dot{q}_n(t), \quad (2)$$

где  $\dot{q}_n(t)$  – программный закон изменения обобщенной координаты  $q_i$ ;

$s$  – крутизна статической характеристики двигателя.

Для следящей системы с ПД-регулятором

$$u(t) = -\lambda_1(q - q_n) - \lambda_2(\dot{q} - \dot{q}_n), \quad (3)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты усиления обратной связи по координате и по скорости;  $s$  – крутизна статической характеристики двигателя.

Для системы управления с отрицательной обратной связью, которая содержит ПД-регулятор,

$$u(t) = s\dot{q}_n(t) - \lambda_1(q - q_n) - \lambda_2(\dot{q} - \dot{q}_n). \quad (4)$$

Уровень идеализации зависит от модели источника энергии и от модели механизма. Это может быть пренебрежение собственной постоянной времени, крутизной статической характеристики двигателя, регулировочными коэффициентами, точностью выполнения кинематической схемы машины, свойствами упругости деталей и т. д.

Затем необходимо определить динамические ошибки программного управления путем подстановки обобщенных движущих сил из первого уравнения системы (1) во второе и решая его относительно обобщенных координат с учетом идеализации модели. Это будет дифференциальное уравнение, решение которого даст реальный закон изменения характеристики двигателя. Сама динамическая ошибка – это разность между требуемым и реальным законами движения выходного звена. Поскольку ошибка является решением дифференциального уравнения, то ее можно представить в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения, которое соответствует динамической ошибке в системе после окончания переходного процесса. Общее решение укажет на ошибку начальных условий, а частное – на неточности описания модели. Причем эта ошибка будет зависеть от времени, т. е. накапливаться.

Описанная методика использовалась при анализе эффективности программного управления транспортным манипулятором, который приводится в движение электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения по синусоидальному закону изменения программного ускорения поворота. При определении динамической ошибки учитывалась возможность использования трех способов управления: программного управления, следящей системы с ПД-регулятором, системы управления с отрицательной обратной связью, которая содержит ПД-регулятор.

Результаты анализа показали, что при программном управлении формируется максимальная динамическая ошибка по угловой координате, равная 0,3 % от величины координаты. Применение следящей системы с ПД-регулятором позволило на порядок уменьшить динамическую ошибку управления при ограничении коэффициентов усиления  $\lambda > 90$ . Используя систему управления с отрицательной обратной связью, которая содержит ПД-регулятор, можно еще уменьшить динамическую ошибку с учетом другого ограничения коэффициентов усиления  $\lambda > 0,5$ .

УДК 669.15:620.178.1

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС  
НА ГЛУБИННУЮ КОНТАКТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ

С. П. РУДЕНКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Рассмотрены виды контактной усталости зубчатых колёс трансмиссий мобильных машин. Показано, что контактное выкрашивание поверхностно упрочнённых зубьев проявляется в двух видах, различающихся и по внешнему виду, и по механизму зарождения усталостных трещин. Первый вид контактного выкрашивания – это поверхностное выкрашивание (питтинг). В зоне, соответствующей полюсу зацепления, этот вид выкрашивания отсутствует, т. к. в ней нет условий для его распространения – отсутствует скольжение профилей зубьев. Питтинг зарождается и распространяется в нижней зоне однопарного зацепления – зоне с максимальными контактными напряжениями и наименьшим приведённым радиусом кривизны. Второй вид – глубинное контактное выкрашивание. Его развитию способствует специфическое напряжённое состояние подповерхностных слоев в зоне контакта, характеризующееся распределением глубинных эквивалентных напряжений по толщине слоя с явно выраженным пиком на определенном расстоянии от поверхности [1, 2].

Установлено, что основным критерием работоспособности зубчатых колёс трансмиссий энергонасыщенных тракторов и большегрузных автомобилей является глубинная контактная усталость рабочих поверхностей зубьев. Для предотвращения глубинного выкрашивания необходимо обеспечить достаточную величину предельных допускаемых напряжений в глубине слоя, превышающую действующие эквивалентные напряжения. Величину предельных допустимых напряжений определяют в зависимости от величины и характера распределения твёрдости по упрочнённому слою [3].

Показано, что расчет на предотвращение глубинного контактного разрушения зубчатой передачи по ГОСТ 21354–87 имеет существенные погрешности, которые способствуют значительной неопределенности результатов расчета. Расчетная глубина зоны наибольших глубинных касательных напряжений  $h_H$  располагается в переходной зоне на границе упрочненного слоя с сердцевиной и не соответствует экспериментальным данным и расчетам контактных напряжений методами прикладной теории упругости. Приведенный радиус кривизны  $\rho_v$ , входящий в формулу расчета  $h_H$ , не соответствует приведенному радиусу кривизны сопряженных профилей зубьев в полюсе зацепления. Величина эффективной твердости  $H_{eff}$ , полученная с учетом значений эффективной толщины слоя  $h_{teff} = h_H + 0,2$ , не соответствует требованиям к величине твердости в опасной зоне упрочненного слоя, в которой происходят глубинные контактные разрушения, а характеризует твердость переходной зоны, расположение которой

намного превышает положение опасной зоны. При расчете допускаемых предельных глубинных напряжений для цементованных зубчатых колес, в отличие от азотированных, не учитывают коэффициент учета числа циклов напряжений или коэффициент долговечности, присутствующий в формуле допускаемых контактных напряжений при расчете на поверхностную контактную прочность. В результате расчета также определено, что параметр  $H_k$ , представленный в ГОСТ 21354–87 как твердость сердцевины, фактически является твердостью на глубине слоя  $h_k$  и не соответствует твердости сердцевины зуба.

Предложена инженерная методика расчёта зубчатых колёс трансмиссий на глубинную контактную выносливость, разработанная по форме изложения материала согласно ГОСТ 21354–87 (приложение 8). Предложенная методика основана на характеристиках сопротивления усталости материала зубьев и установленной зависимости предела глубинной контактной выносливости от твёрдости и структурных параметров упрочнённого слоя [2, 3]. Расчет выполняют по отношению к шестерне исследуемой зубчатой передачи. Расчет ресурса выполняют в критической зоне упрочненного слоя с наибольшими глубинными эквивалентными напряжениями, являющейся очагом зарождения глубинного контактного разрушения. Выносливость оценивают по расчетному сроку службы шестерни, который сравнивают с её планируемым сроком службы. Приведён пример расчёта ресурса ведущей шестерни зубчатой передачи.

Показано, что результаты расчета по предложенной методике совпадают с данными ресурсных стендовых испытаний. Так, зубчатое колесо с модулем 4,5 мм из стали 20ХН3А имеет прогрессирующее глубинное контактное выкрашивание всех зубьев после наработки на стенде 300 ч. Расчетная долговечность данного зубчатого колеса по режимам стендовых испытаний составляет 310 ч. Стендовые испытания в объеме 300 ч не позволили определить долговечность зубчатого колеса из стали 20ХГНМБА, расчетная долговечность которого составляет 840 ч.

Инженерная методика расчёта зубчатых колёс трансмиссий на глубинную контактную выносливость, разработанная по форме изложения материала в ГОСТ 21354–87 (приложение 8), рекомендована для практического использования в расчетах на прочность зубчатых цилиндрических эвольвентных передач внешнего зацепления.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тескер, Е. И. Современные методы расчета и повышения несущей способности поверхностно упрочненных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е. И. Тескер. – Москва: Машиностроение, 2011. – 434 с.

2. Руденко, С. П. Построение кривых глубинной контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С. П. Руденко, А. Л. Валько // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 2. – С. 48–54.

3. Руденко, С. П. Предел глубинной контактной выносливости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – № 1. – С. 48–54.



УДК 621.833

## МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕС ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

С. Н. ХАТЕТОВСКИЙ, В. Б. ПОПОВ, М. А. ГАЛЮЖИН, В. М. ПУСКОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Зубчатые колеса прецессионной передачи [1] образуют особые зацепления. Исследование этих зацеплений удобно выполнять при помощи компьютерного моделирования. В частности, при помощи компьютерного моделирования можно проанализировать КПД зацепления, контактные напряжения, точность. Для компьютерного анализа свойств зацепления колес прецессионной передачи необходимо подготовить их твердотельные модели. При этом, как правило, основной проблемой является синтез контактных поверхностей.

Одно из колес прецессионной передачи с целью обеспечения технологичности конструкции снабжается относительно простыми по геометрии зубьями. В частности, роль таких зубьев могут выполнять цевки. Геометрия же зубьев сопряженного колеса соответствует уравнению контакта и, как правило, достаточно сложна, чтобы вызвать определенные трудности при компьютерном моделировании.

Для синтеза модели сопряженного колеса в среде системы автоматизированного проектирования разработана специальная программа, по которой путем соответствующего кинематике прецессионной передачи пошагового вычитания твердотельной модели цевки из определенной твердотельной модели-заготовки получается контактная поверхность сопряженного колеса. Недостатком данной методики является отсутствие ассоциативных связей между контактной поверхностью цевки и контактной поверхностью сопряженного колеса.

Согласно другой разработанной методике синтеза модели сопряженного колеса контактная поверхность последнего формируется из каркаса изопараметрических кривых. При этом каждая такая кривая хранится в отдельном файле. Все файлы с изопараметрическими кривыми входят в сборку, в рамках которой при помощи соответствующих САД-инструментов синтеза поверхностей формируется контактная поверхность сопряженного колеса. Существует несколько путей реализации данной методики. Например, в САПР NX можно воспользоваться таким инструментом, как семейство деталей, управляемых электронной таблицей.

Данная методика лишена недостатков первой методики, однако имеет свои недостатки, основным из которых является большое количество файлов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хатетовский, С. Н.** Модификация зубьев колес передач эксцентрикового типа: монография / С. Н. Хатетовский, П. Н. Громыко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – 180 с.: ил.

УДК 621.762

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ СТРУЖЕЧНЫХ ОТХОДОВ  
ЛИТЫХ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

А. В. АБОРКИН, Е. С. ПРУСОВ, Д. М. БАБИН

Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Владимир, Россия

Разработка экономически эффективных технологий рециклинга отходов механической обработки металлокомпозигов в условиях действующих производств является актуальной научной проблемой [1, 2]. Цель данного исследования состоит в определении степени влияния режимов деформационной обработки порошков, полученных из некомпактных отходов (стружка) литых металломатричных композитов, на изменение свойств компактных заготовок.

Стружку получали путем наружного точения отливок из композиционного материала АК12 + 10 об. % В<sub>4</sub>С на станке АТПУ-125. Полученную в результате токарной обработки стружку размалывали в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6 с применением поверхностно-активных веществ. Для размолва использовали керамический стакан, изготовленный из ZrO<sub>2</sub>, и керамические шары диаметром 8 мм из того же материала. Консолидацию полученных размолом композиционных порошков проводили с использованием предварительно нагретой пресс-формы при давлении 330 МПа. Температуру нагрева пресс-формы варьировали в диапазоне до 350 °С...500 °С. Время выдержки под давлением составило 10 мин. В результате были получены компактные цилиндрические образцы диаметром 17 мм. Также были изготовлены контрольные образцы из исходной стружки. Температура консолидации составила 450 °С. Измерение остаточной пористости образцов выполнено методом гидростатического взвешивания. Установлено, что литой образец имел остаточную пористость (2,73 ± 0,17) %. При этом остаточная пористость образца, консолидированного из стружки, составила (5,52 ± 0,32) %. В то же время для консолидированных из порошка образцов, в зависимости от температуры прессования, остаточная пористость изменялась в диапазоне (1,94 ± 0,28) %...(1,39 ± 0,41) %. Таким образом, увеличение температуры консолидации с 350 °С до 500 °С вело к снижению остаточной пористости на ~25 %. Это вызвано повышением реологических свойств материала с ростом температуры прессования, что способствует лучшему заполнению пор, рыхлостей и полостей в матричном материале и на границе раздела «матрица – армирующие частицы». Результаты измерений твердости по Роквеллу (шкала В) образцов сплава АК12 + 10 об. % В<sub>4</sub>С показывают, что твердость консолидированных путем горячего прессования образцов ожидаемо была выше, чем отливок. Так, например, твердость слитка составляла (39,35 ± 3,2) HRB, а твердость образцов, консолидированных при 450 °С из стружки и порошка, – (42,75 ± 1,2) и (71,4 ± 1,5) HRB соответственно. Таким образом, стружечный и порошковый образцы имели твердость на ~8 % и ~80 % соответственно больше, чем литой образец. Механические

испытания на сжатие литых и консолидированных из стружки и порошка композиционных образцов проводили на универсальной испытательной машине Time Group WDW-100E при скорости сжатия  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Цилиндрические образцы для испытаний на сжатие диаметром 6 мм были получены электроэрозионной резкой на станке Mitsubishi VA8. Образцы при резке располагали в теле прессовки равномерно по кругу. Продольная ось образцов совпадала с направлением приложения усилия при прессовании. Для уменьшения трения на торцевых поверхностях образцов использовали графитовую смазку. Испытания образцов на сжатие показывают, что исследуемые литые композиционные материалы обладают более высоким уровнем пластичности по сравнению с консолидированными из порошка образцами. При этом деформация до разрушения последних не превышает 10 %, в то время как литой композиционный материал подвергался деформации 25 % без разрушения. Для прессованных из стружки композитов также характерна высокая пластичность. Тем не менее для консолидированных из порошка образцов характерно повышение прочностных свойств по сравнению с литым композитом и прессованным из стружки. В частности, условный предел текучести увеличивается в  $\sim 1,5$  и  $\sim 2,3$  раза по сравнению с литым и прессованным из стружки образцами соответственно. Для консолидированных из порошка образцов условный предел текучести составил  $(380 \pm 7,1)$  МПа, а для литого композиционного материала данный параметр был  $(247,1 \pm 18,4)$  МПа. Для прессованного из стружки образца отмечено падение условного предела текучести до  $(165,4 \pm 2)$  МПа. Изменение температуры консолидации с  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  вело к снижению условного предела текучести порошковых композитов на 15 %...20 % с одновременным ростом деформации до разрушения в 1,5–2 раза. Уровень прочностных свойств порошкового композита возрастает благодаря улучшению равномерности распределения и уменьшению размера армирующих частиц в ходе высокоэнергетического шарового размолла. В целом, полученные результаты подтверждают, что стружка, полученная при механической обработке слитков из металломатричных композитов, может быть повторно использована в качестве исходного материала для получения композитов методами порошковой металлургии.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10432 (<https://rscf.ru/project/21-79-10432/>).*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Influence of Mechanical Processing of Chip Waste from Cast Al-Si-B4C Composites on the Structure and Properties of Consolidated Billets / A.V. Aborkin [et al.] // Non-Ferrous Metals. – 2023. – № 2. – P. 41–46.
2. Твердофазная переработка некомпактных отходов литых металломатричных композитов / А. В. Аборкин [и др.] // Металлург. – 2023. – № 11. – С. 93–100.

УДК 620.178.1:621.74.04:669.15-196.54

ИСПЫТАНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЗАКЛАДНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ  
СТЕРЖНЕЙ ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО ИЧХ

В. М. АНДРИЕНКО, П. Ю. ДУВАЛОВ, А. И. КАЛЕНТИОНОК

Институт технологии металлов НАН Беларуси

Могилев, Беларусь

На текущий момент в ИТМ НАН Беларуси проводятся исследования по использованию в качестве закладного охлаждающего элемента стержней из заэвтектического состава износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) для улучшения механических свойств внутренней части формируемой отливки. Перед непосредственным внедрением стержней в отливку они были подвергнуты различным исследованиям, включая испытания на износостойкость.

Данное исследование проводилось на стержнях диаметром 11 мм, которые были получены в трех типах форм: в форме из ХТС, в тонкостенном кокиле и в тонкостенном кокиле, зафутерованном в ХТС. Тонкостенный кокиль изготавливался из электросварной трубы, толщина стенки которой составляла 1,5 мм. Перед заливкой, для упрощения последующего извлечения стержней, внутренняя поверхность кокилей покрывалась термостойкой антипригарной краской «Амтерм С30».

Стержни отливались из двух составов заэвтектического износостойкого хромистого чугуна. Первый вариант химического состава (%): 3,9 С; 17,5 Cr; 0,45 Ni; 0,57 Mn; 0,76 Si; 0,22 W; 0,12 V; 0,18 Mo. Второй вариант химического состава (%): 4,62 С; 19,23 Cr; 0,51 Ni; 0,64 Mn; 0,82 Si; 0,26 W; 0,14 V; 0,21 Mo.

На рис. 1 представлены стержень из заэвтектического ИЧХ после износа и деталь, в которую планируется внедрение таких стержней.

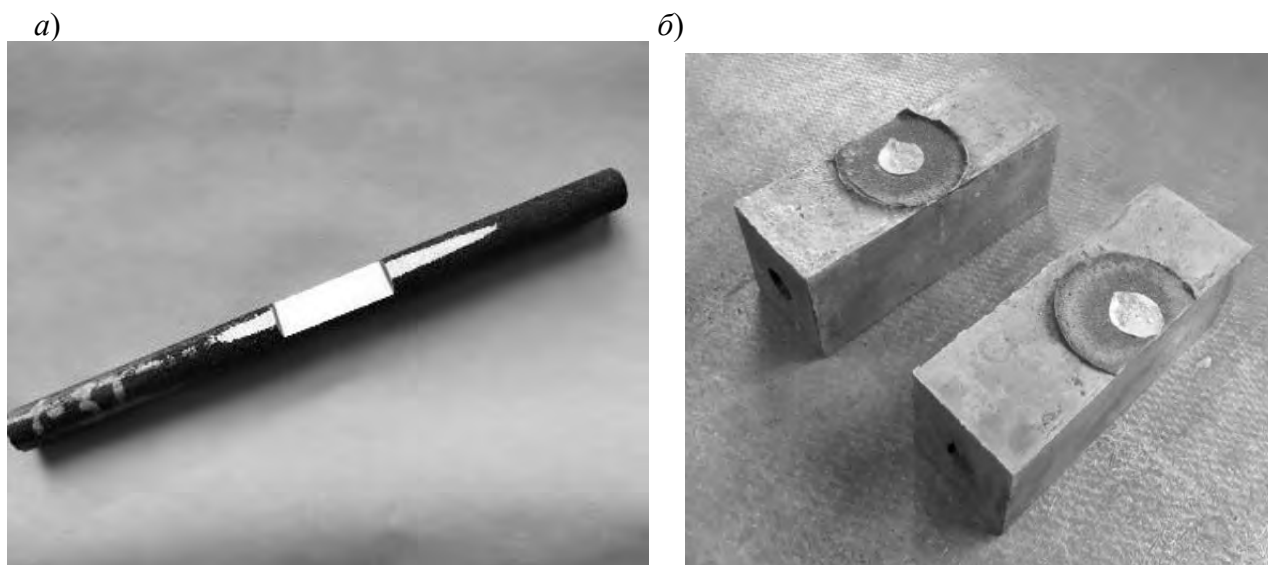


Рис. 1. Экспериментальные образцы: *а* – стержень из заэвтектического ИЧХ диаметром 11 мм; *б* – деталь «Вкладыш отбойный» из эвтектического ИЧХ

Испытания на износ проводились на лабораторном стенде по методике, описанной в [1]. Результаты испытаний для большей наглядности представлены в виде графика на рис. 2.

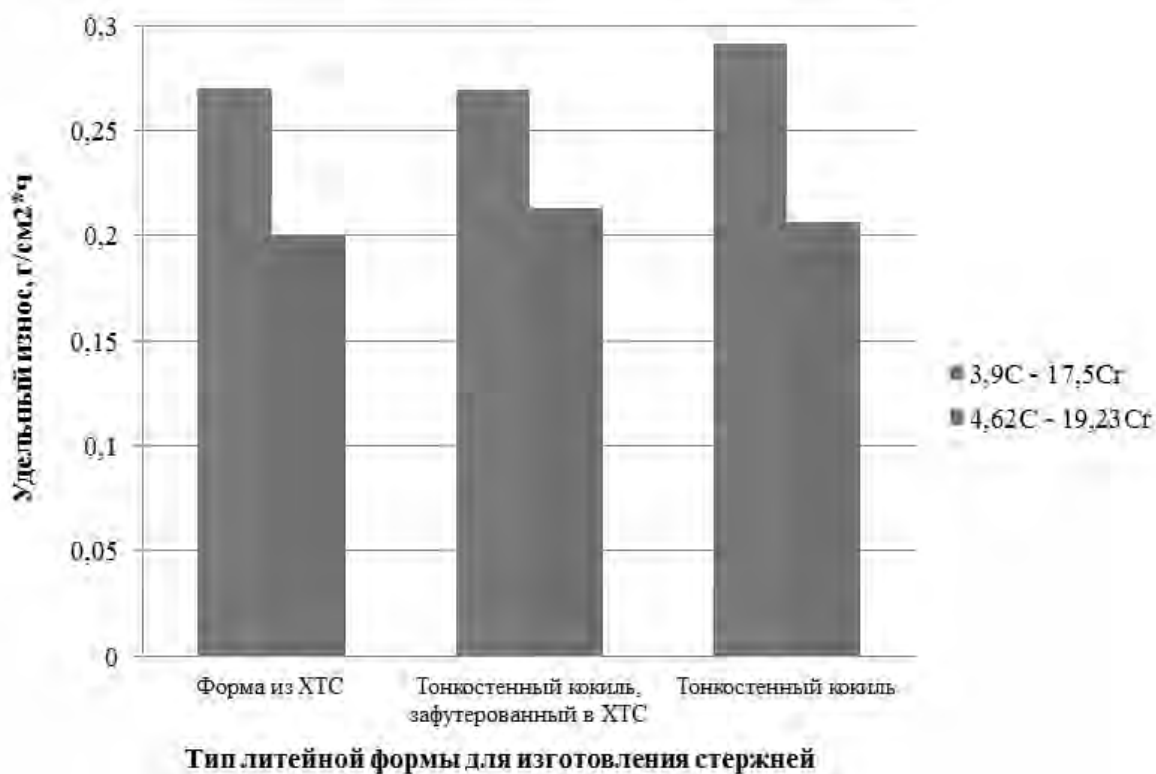


Рис. 2. Удельный износ экспериментальных образцов

По результатам исследований была выявлена зависимость износа экспериментальных стержней от степени эвтектичности. Более заэвтектический состав продемонстрировал меньший износ. Так, стержень с 4,62 % С и 19,23 % Cr, полученный в форме из ХТС, продемонстрировал на 26 % меньший износ, чем полученный таким же способом стержень с 3,90 % С и 17,50 % Cr. Для стержней, изготовленных в тонкостенном кокиле, эта разница еще несколько выше. Вместе с тем тип литейной формы не оказывает существенного влияния на величину износа. Это также подтверждается микроструктурным анализом образцов стержней.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение износостойкости деталей из хромистых чугунов, полученных литьем в кокиль / Е. И. Марукович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов X Междунар. науч.-техн. конф.: в 3 кн. Кн. 3: Обработка металлов давлением, Минск, 16–18 сент. 2015 г. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 52–57.

УДК 621.74.04

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЗАКЛАДНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ  
СТЕРЖНЕЙ ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО ИЧХ

В. М. АНДРИЕНКО, П. Ю. ДУВАЛОВ, В. А. ПУМПУР

Институт технологии металлов НАН Беларуси

Могилев, Беларусь

Была проведена серия экспериментов по заливке из нескольких составов заэвтектического износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) стержней различного диаметра в несколько типов форм для последующего изучения и применения при изготовлении вкладышей отбойных.

Стержни отливались в формы трех типов: в холодно-твердеющую смесь (ХТС), в тонкостенный кокиль и в тонкостенный кокиль, зафутерованный в ХТС. Последний вариант имеет более практичное и технологичное исполнение литейной формы. Тонкостенные кокили (обоих типов) изготавливались из стандартных водогазопроводных и электросварных труб. Толщина стенки кокилей составляла 1,5 мм для стержней Ø11 мм и 3 мм для стержней Ø15 мм и Ø20 мм. Перед началом заливки, с целью облегчения последующего удаления и получения лучшей поверхности стержней, внутреннюю часть кокилей покрывали термостойкой антипригарной краской «Амтерм С30».

Стержни отливались из двух составов заэвтектического износостойкого хромистого чугуна. Первый вариант химического состава (%): 4,73 С; 19,64 Cr; 0,34 Ni; 0,49 Mn; 0,32 Si; 0,25 W; 0,17 V; 0,29 Mo. Второй вариант химического состава (%): 4,62 С; 19,23 Cr; 0,51 Ni; 0,64 Mn; 0,82 Si; 0,26 W; 0,14 V; 0,21 Mo.

Был проведен анализ микроструктур полученных стержней из заэвтектического ИЧХ главным образом для сравнения влияния типа литейной формы на размер карбидной фракции отливки. Примеры подготовленных шлифов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Подготовленные шлифы для анализа микроструктуры образцов стержней из заэвтектического ИЧХ

На микроструктурах (рис. 2, *a*, *б*) стержней первого варианта химического состава (4,73 % С и 19,64 % Cr) заметно влияние кокиля на структуру стержня при  $\varnothing 15$  мм.

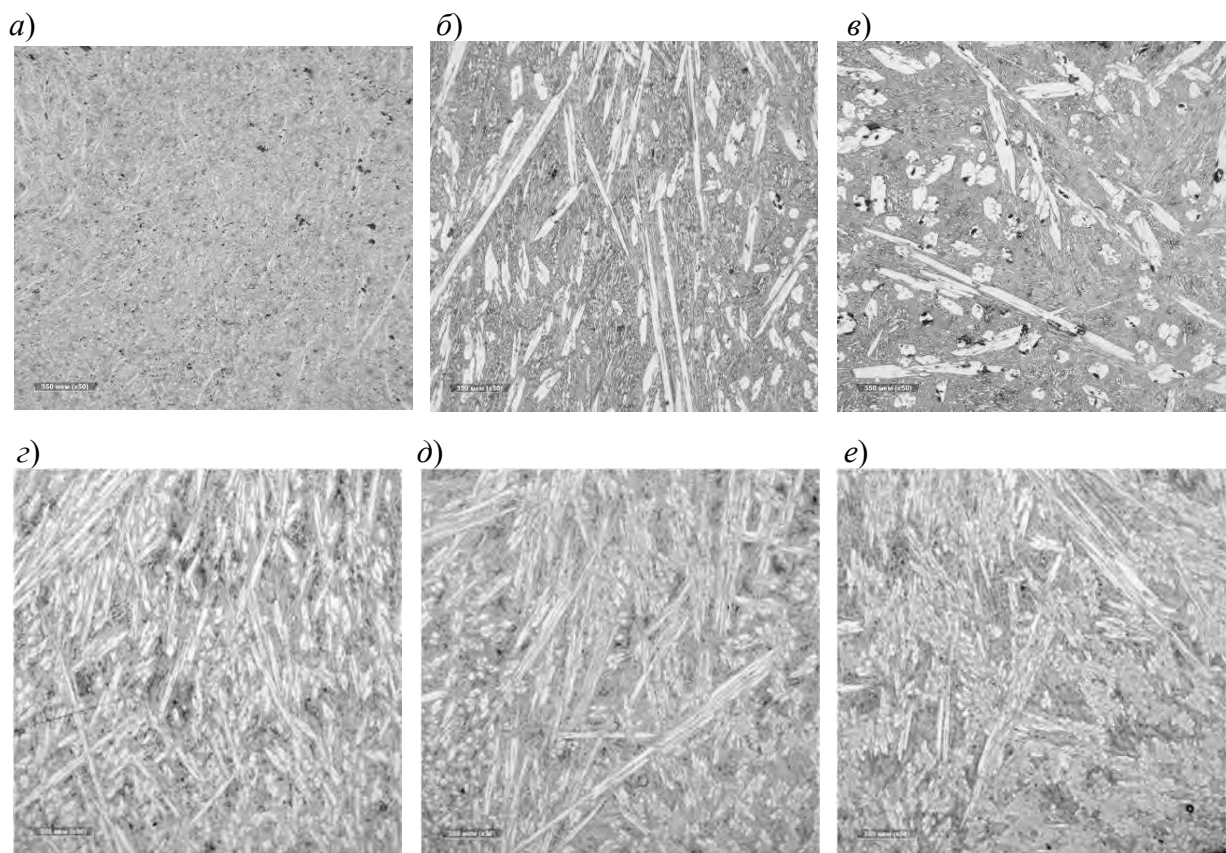


Рис. 2. Микроструктуры стержней из заэвтектического ИЧХ (увеличение  $\times 50$ ): *a* – стержень  $\varnothing 15$  мм, полученный в зафутерованном в ХТС кокиле; *б* – стержень  $\varnothing 15$  мм, полученный в форме из ХТС; *в* – стержень  $\varnothing 20$  мм, полученный в форме из ХТС; *в–д* – стержни  $\varnothing 11$  мм, полученные в форме из ХТС, зафутерованном в ХТС кокиле и кокиле соответственно

При том же диаметре в 15 мм стержень, залитый в ХТС (см. рис. 2, *б*), имеет значительно более крупную карбидную составляющую. Увеличение диаметра до 20 мм еще более укрупняет микроструктуру (рис. 2, *в*).

Исходя из изучения микроструктур стержней  $\varnothing 11$  мм (рис. 2, *з–е*), имеющих второй вариант химического состава (4,62 % С и 19,23 % Cr), можно сделать вывод, что при таком диаметре тип формы не имеет большого значения, т. к. микроструктуры выглядят примерно одинаково.

Также можно сделать вывод об эффективности применения кокиля, зафутерованного в ХТС. Это видно из того, что микроструктуры стержней  $\varnothing 11$  мм (см. рис. 2, *з, д*) имеют минимальное различие между собой. Однако, судя по микроструктуре с самой мелкой карбидной составляющей (см. рис. 2, *а*), применение зафутерованного кокиля в ХТС достаточно для значительного измельчения структуры. Маловероятно, что обычный тонкостенный кокиль сможет сделать ее ощутимо мельче.

УДК 538.9

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

О. В. АНДРУХОВА, И. С. САФРОНОВ, А. И. УШАКОВ

Университет науки и технологий МИСИС

Москва, Россия

Одним из быстро развивающихся методов получения материалов с заданными свойствами поверхности является обработка короткоимпульсным лазерным излучением. Ряд экспериментальных исследований, посвященных изменению механических свойств поверхности твердых материалов под воздействием лазерного излучения, подтверждает возможность повышения прочностных свойств, а также одновременного повышения микротвердости и пластических характеристик при определенных режимах обработки [1–4].

Для понимания механизма увеличения прочности поверхности металлических сплавов при лазерном воздействии необходим анализ изменения дефектной структуры материала. Компьютерное моделирование позволяет изучить физические процессы, протекающие в исследуемых образцах, как на молекулярном, так и континуальном уровнях. Метод молекулярной динамики (ММД) дает возможность проанализировать эволюцию структуры и картины распределения атомов вблизи дефектов, на поверхности и в объеме материала. В рассматриваемой задаче существенным оказывается понимание того, как распространяется фронт ударной волны, формирующейся за счет возникающего градиента температур [5, 6]. Поэтому актуальным оказывается решение задачи теплопроводности с учетом распределения микро- и нанопор в моделируемом объеме.

Получены закономерности нагрева материала вблизи системы наноразмерных пор с учетом её геометрии. Моделировалось распределение температуры в приповерхностных слоях титанового образца, идеального или с предварительно заданной конфигурацией идеальных нанопор. Рассматриваемые дефекты обладают сферической формой, в них отсутствуют центры напряжений, нет теплообмена за счет переизлучения. Выявление особенностей формирования изотерм осуществлялось путем сравнения результатов в идеальном и дефектном кристалле.

На начальном этапе моделирования рассматривалась квазитрехмерная континуальная модель. В установившемся режиме лазерной обработки вещества свободная граница задавалась в виде вогнутой эллиптической дуги. Известно [2, 3, 5], что значительное изменение механических свойств после селективной лазерной обработки наблюдается в тонких приповерхностных слоях, поэтому размеры пор геометрии были выбраны так, чтобы они располагались в слое толщиной не более 1 мкм, а при нагревании наблюдался максимальный градиент температур между верхней и нижней порой.



Согласно результатам моделирования, была установлена взаимосвязь между формирующимся скалярным полем температур в образце и конфигурацией системы пор, построены изотермы в идеальном и бездефектном кристалле. Наличие пор существенно влияет на распространение температурного фронта. Область приповерхностного слоя над порами прогревается быстрее и имеет более высокую температуру, чем аналогичная область в бездефектном кристалле. При этом слои материала, располагающиеся геометрически ниже уровня пор, в бездефектном кристалле имеют более высокую температуру. Следовательно, можно ожидать пластического движения нагретого материала к поре. Кроме того, из-за температурного градиента выше и ниже поры может произойти деформация и заполнение более нагретым веществом. Учитывая предложенную модель (отсутствие газов в порах), возможно полное заживление поры, за счет чего все пространство заполняется легкодвижимыми компонентами металлического сплава.

Полученные распределения температур и построенные изотермы необходимы для задания начальных условий при моделировании процесса селективной лазерной обработки поверхности титана в рамках атомистической модели с использованием ММД. Такой подход дает возможность проанализировать процесс термоактивируемого «залечивания» пор и микротрещин с учетом геометрии системы пор в приповерхностном слое, а также описать механизм лазерного залечивания микропор в поверхностном слое металла.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Safronov, I. S.** Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation / I. S. Safronov, A. I. Ushakov // *Defect and Diffusion Forum.* – 2021. – Vol. 410. – P. 469–474.
2. **Safronov, I. S.** Influence of environment at laser processing on microhardness of amorphous-nanocrystalline metal alloy / I. S. Safronov, I. V. Ushakov, V. I. Minaev // *Materials Science Forum.* – 2022. – 1052. – P. 50–55.
3. Study of the effect of coherent radiation on the properties of aramid fibers and fabrics / O. V. Andrukhova [et al.] // *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedenia.* – 2022. – Т. 19, № 1. – P. 125–131.
4. Влияние когерентного излучения на прочность арамидных волокон и тканей / С. В. Овечкин [и др.] // *Ползуновский вестн.* – 2021. – № 2. – С. 233–238.
5. Physical Mechanism of Selective Healing of Nanopores in Condensed Matter under the Influence of Laser Irradiation and Plasma / Z. Wang [et al.] // *Nanomaterials.* – 2024. – № 14 (2). – P. 139–153.
6. Физика воздействия высокотемпературного импульсного нагрева на дефекты в поверхностном слое металлического сплава / И. В. Ушаков [и др.] // *Металлург.* – 2023. – № 7. – С. 74–79.

УДК 669.620.179

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ  
ЦЕМЕНТУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

А. Л. ВАЛЬКО, С. П. РУДЕНКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Для обеспечения высокой износостойкости и долговечности стальных зубчатых колес проводят их химико-термическую обработку (ХТО), при которой деталь подвергают цементации и последующей закалке для обеспечения требуемой твердости поверхностного слоя и сердцевины. ХТО большинства деталей проводят в проходных и камерных печах с контролируемой насыщающей атмосферой [1]. Длительное время цементации при высоких температурах оказывает влияние на структуру стали вследствие ее перегрева. Особенно крупнозернистыми становятся поверхностный науглероженный слой и переходная зона с содержанием углерода 0,3 %...0,4 % С. В связи с этим выбор режимов ХТО усложняется тем, что содержание углерода после цементации не одинаково в разных зонах сечения детали. Оно уменьшается от 0,8 %...1,0 % в наружном слое детали до 0,15 %...0,25 % в ее сердцевине. Поэтому для малоуглеродистой сердцевины нужен более высокий нагрев при закалке, чем для поверхностного слоя.

С учетом требований к твердости и структуре деталей после цементации применяют сложную их термическую обработку [2]: первая закалка обеспечивает измельчение зерна сердцевины детали, но не формирует благоприятную структуру ее поверхностного слоя, т. к. нагрев до 880 °С...900 °С для науглероженного слоя чрезмерно высок. Вторичная закалка с нагревом до 740 °С...760 °С обеспечивает измельчение зерна цементованного слоя и формирует в нем структуру, нужную для получения высокой поверхностной твердости детали.

Необходимость подвергать цементованные детали двойной закалке – основной недостаток известного способа, т. к. в результате быстрого охлаждения от температур 880 °С...900 °С в масло возникают большие внутренние напряжения, что приводит к повышенной деформации детали. Повторный нагрев и закалка также приводит к неконтролируемому короблению деталей. Недостаток способа – в невозможности обеспечения распределения твердости в детали после цементации, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 30634–99 [3].

Задачей нового способа [4] было обеспечение распределения твердости в детали после цементации, удовлетворяющей требованиям [3]. Она решена в способе химико-термической обработки, в котором цементацию проводят в две стадии. Первую стадию проводят при углеродном потенциале насыщающей атмосферы  $(1,2 \pm 0,05)$  %, а вторую – при углеродном потенциале, соответствующем эвтектоидному содержанию углерода в диффузионном слое стали цементируемой детали. Время проведения второй стадии составляет  $(15 \pm 2)$  % от общего времени цементации. Затем подстуживают деталь до температуры  $(890 \pm 10)$  °С с выдержкой  $(0,5 \pm 0,1)$  ч при этой температуре, после чего деталь

охлаждают до температуры ниже 100 °С со скоростью 20 °С/мин...200 °С/мин, далее осуществляют повторный нагрев детали до температуры 760 °С...790 °С, проводят закалку в масло и выполняют низкий отпуск при температуре  $(160 \pm 5)$  °С в течение 2,5 ч.

Задача способа решена обеспечением мелкозернистой структуры и требуемой твердости сердцевины и упрочненного слоя детали. На рис. 1 представлено распределение твердости в цементированном слое двух деталей из одной садки после цементации, подстуживания до 890 °С, выдержки 0,5 ч, дальнейшего охлаждения (нормализации) до 100 °С со скоростью 30 °С/мин (кривые 1 и 2), а также последующей закалки в масло от 780 °С и низкого отпуска 3 ч при 160 °С (кривые 3 и 4).

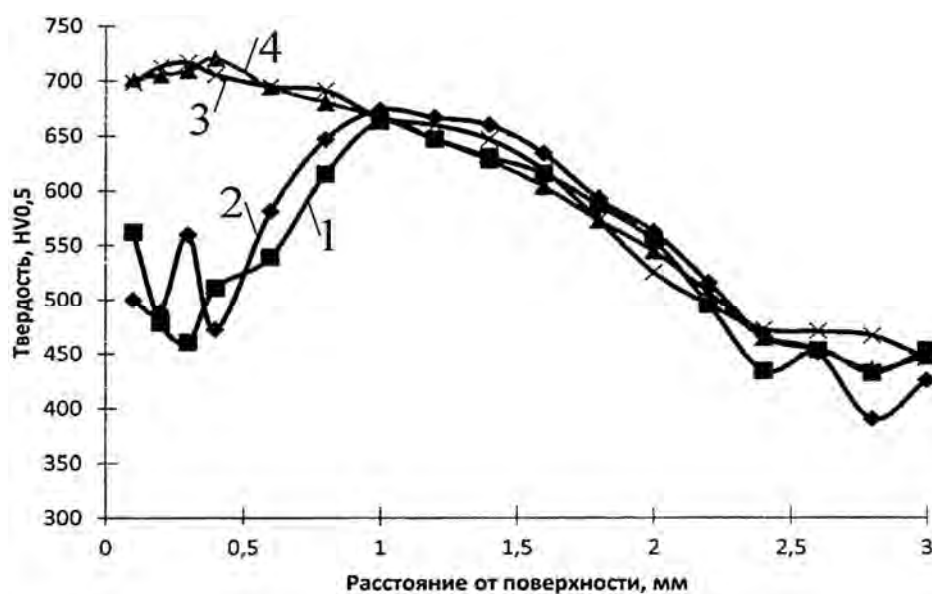


Рис. 1. Распределение твердости по сечению цементованного слоя деталей из одной садки после цементации и разной термической обработки

Глубина цементированного слоя после полного цикла ХТО составила 2,1 мм (кривые 3 и 4), а микротвердость поверхности – 710 HV<sub>0,5</sub> (60 HRC). Эти характеристики структуры и твердости поверхностного слоя отвечают требованиям [3]. ХТО детали по [4] обеспечила мелкозернистую структуру и требуемую ГОСТ 30634–99 [3] твердость и сердцевины, и упрочненного слоя детали.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – Москва: Металлургия, 1985. – 256 с.
2. Сагарадзе, В. С. Повышение надежности цементуемых деталей / В. С. Сагарадзе. – Москва: Машиностроение, 1975. – 216 с.
3. ГОСТ 30634–99. Колеса зубчатые. Технические требования к упрочненному слою. – Минск: Госстандарт, 2000.
4. Способ химико-термической обработки стальной детали: пат. ВУ 24089 / А. Л. Валько, С. П. Руденко, С. Г. Сандомирский.

УДК 621.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЗАЩИТНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПОЖАРНОЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Т. А. ГОВОР, О. В. РЕВА

Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь  
Минск, Беларусь

В современном мире не теряет своей актуальности проблема преждевременного выхода из строя техники самого различного назначения по причине интенсивной коррозии и механического износа ответственных деталей [1]. Пожарная аварийно-спасательная техника и оборудование эксплуатируются в экстремальных условиях (постоянное воздействие агрессивных растворов и суспензий огнетушащих средств, резкие перепады температур), их детали и механизмы, часто изготовленные из низкосортных сталей и сплавов алюминия, наиболее уязвимы к разрушению. Именно поэтому для упрочнения деталей пожарной аварийно-спасательной техники и оборудования требуются новые стойкие материалы, способные выдерживать длительные механические и тепловые нагрузки, успешно противостоять коррозии в агрессивных средах.

Один из технически достаточно простых и надежных путей получения таких материалов – электрохимическое нанесение на уязвимые детали защитных коррозионно- и износостойких покрытий на основе никеля, его сплавов и композитов. Гидрометаллургический синтез металлопокрытий позволяет широко варьировать их химический и фазовый состав, микроструктуру и физико-механические свойства, а также, что недоступно для высокоэнергетических технологий напыления, получать равномерные по толщине слои на деталях сложной формы [2].

Несмотря на значительное количество описываемых в литературе электролитов никелирования различного комплексного состава, большинство из них характеризуются существенными недостатками: низкой скоростью кристаллизации покрытия; протеканием множества побочных и конкурирующих процессов; быстрой пассивацией поверхности [2, 3]. Весьма перспективным представляется использование раствора кремнефтористого никелирования, который хотя и известен достаточно давно, но закономерности происходящих в нем процессов и влияние на них комплекса различных факторов очень слабо изучены.

Были исследованы закономерности электрохимического синтеза никелевых покрытий из кислых кремнефтористых электролитов при варьировании ряда факторов (плотность тока, температура раствора, концентрация кремнефторида никеля).

По результатам эксперимента можно сделать вывод (рис. 1), что с ростом плотности катодного тока происходит устойчивое увеличение скорости осаждения никелевых покрытий, причем ожидаемого перегиба на кривых при высоких плотностях тока, характерного для множества других электролитов и

связанного с образованием продуктов неполного восстановления никеля, не наблюдается, что означает как отсутствие диффузионных затруднений в исследуемых электролитах, так и сверхполяризации восстановления никеля на катоде.

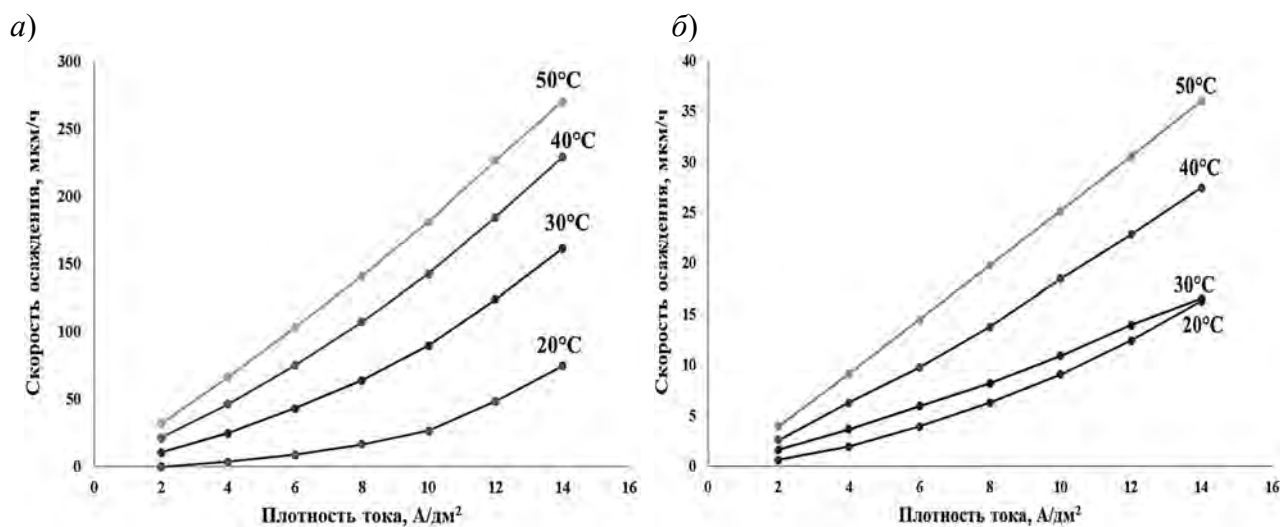


Рис. 1. Зависимости скорости осаждения никелевых покрытий от плотности тока при разных температурах: *а* – концентрация  $\text{Ni}[\text{SiF}_6]$  в электролите 1,5 моль/дм<sup>3</sup>; *б* – 2 моль/дм<sup>3</sup>

Однако при плотностях тока более 12 А/дм<sup>2</sup> существенно интенсифицируется побочный процесс выделения водорода, что, в свою очередь, негативно влияет на качество получаемых покрытий – наблюдается рост наводороживания осадков и, соответственно, внутренних напряжений.

Повышение температуры электролита, согласно классическим данным, увеличивает скорость осаждения покрытий, но при температуре выше 40 °С резко ускоряются процессы гидролиза комплексных ионов никеля и разложения кремнефторид-ионов, что при отсутствии видимого замедления электрокристаллизации металла явно снижает буферную емкость электролита, а также существенно увеличивает напряженность покрытий.

Оптимальная концентрация  $\text{Ni}[\text{SiF}_6]$ , исходя из полученных данных, не превышает 400 г/л. Таким образом, проведенные исследования позволили установить оптимальные состав электролита и режимы синтеза защитных покрытий, при которых не возникает диффузионных затруднений и получают малонапряженные толстые защитные пленки с высокой скоростью.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неверов, А. С.** Коррозия и защита материалов / А. С. Неверов, Д. А. Родченко, М. И. Цырлин. – Минск: Вышэйшая школа, 2007. – 222 с.
2. **Гамбург, Ю. Д.** Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю. Д. Гамбург. – Москва: РАН ИФХ; Янус-К, 1997. – 384 с.
3. **Гамбург, Ю. Д.** Гальванические покрытия: справочник по применению / Ю. Д. Гамбург. – Москва: Техносфера, 2008. – 359 с.

УДК 621.793.1

## ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ТИТАНА И ГАФНИЯ ПЛАЗМЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

М. М. ГРЕБЕНЩИКОВА, М. М. МИРОНОВ, В. В. КОСТЫЛЕВ

Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Казань, Россия

Для получения материалов биомедицинской направленности, а именно хирургического инструмента, комбинированные покрытия конденсировали на основе нитридов гафния и титана. Гафний, аналог титана и циркония, имеет плотную электронную структуру и меньший атомный диаметр, чем цирконий. Такое строение атома придает покрытиям на основе нитридов гафния гарантированную устойчивость к химически активным средам живого организма и условиям стерилизации металлического медицинского инструмента.

Техническую реализацию нанокomпозиционного покрытия провели на ионно-плазменной установке с электродуговыми испарителями титана и гафния. Слои нитридов титана и гафния наноразмерной толщины конденсировали в среде азота при давлении 0,1...0,2 Па в период за 6...12 с перемещения подложки в области выхода пароплазменного потока из испарителя. Толщина конденсатов нитридов при этих параметрах составила от 10 до 40 нм, была рассчитана полуэмпирически и измерена фактически на срезе покрытия толщиной 3...5 мкм со служебными характеристиками и подтвержденным составом ОЖ-спектрометрией и дифрактометрией [1].

Покрытия, полученные методом осаждения из плазменной фазы в вакууме, имеют наноструктуру. Их строение представляет собой многослойную структуру, причем толщина каждого слоя – менее 100 нм, а общая толщина достигает 5 мкм. Основным регулирующим толщину параметром является время, или продолжительность процесса осаждения. На рис. 1 представлены многослойная структура скола покрытия и скол такого покрытия с большим увеличением.

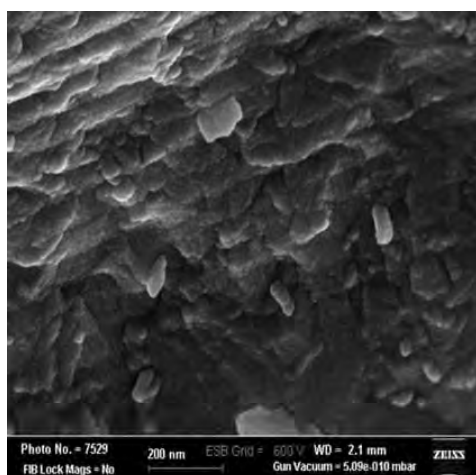


Рис. 1. Скол многослойного покрытия

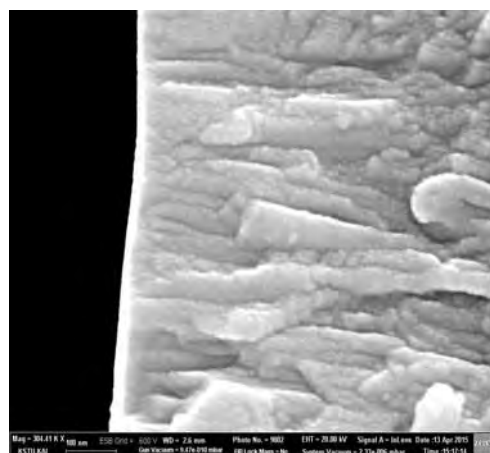


Рис. 2. Столбчатые кристаллы структуры замещения

В соответствии с эффектом Холла – Петча слои выполняют упрочняющую функцию, при этом увеличиваются твердость материала покрытия и его прочность. В процессе осаждения происходит образование новых химических соединений, в том числе и прототипов вещества в виде кластерных структур нитридов, карбидов. Предполагается образование решетчатой кластерной структуры, например пленки нитридов, армированной молекулами  $Ti_3$  и  $TiN$ . В конденсированных ионно-плазменным методом наноразмерных слоях нитрида титана ( $TiN$ ) имеются нанокластеры титана, которых тем больше, чем меньше давление в вакуумной камере реагирующего газа азота, при этом температура процесса конденсации не влияет на их количество. После закрепления зародышей с молекулярной структурой образуется кластерная пространственная форма нитрида, которая перерастает в островки-зачатки гранцентрированной кубической решетки (ГЦК) структуры. Рост структуры сопровождается столбчатыми образованиями, где, кроме кристаллов внедрения  $TiN$  и  $Ti_2N$ , образуются полости столбчатой формы, которые постепенно заполняются атомами титана. Так структура достраивается до сплошной без пор между столбчатыми кристаллами и подложкой. Такой механизм не противоречит правилу Хэгга по достижению плотной структуры. На рис. 2 представлена структура замещения покрытия нитрид титана + нитрид гафния, полученная совместным осаждением в среде азота пониженного давления. Благодаря значительному увеличению более чем в 10 тыс. раз на изображении хорошо просматриваются столбчатые кристаллы, упорядоченные в наноструктуру. Можно предположить места расположения бывших щелей между кристаллами, которые в настоящее время заполнены нитридами. Такая плотная структура придает материалу покрытия уникальные свойства по твердости, коррозионной стойкости и прочности. Защитные покрытия на основе титаногафниевых нитридных конденсатов, полученных из плазменной фазы, угнетают рост болезнетворной микрофлоры бактериального и микозного происхождения. Независимо подтверждена активность в отношении музейных и госпитальных штаммов стафилококка, синегнойной и кишечной палочки, клебсиеллы и морганеллы [2]. Устойчивость покрытия к средствам стерилизации, включая перекись водорода, подтверждается техническими испытаниями и результатами медицинских экспериментов [3].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рентгендифракционный анализ покрытий совместной конденсации нитридов титана и гафния из плазменной фазы / М. М. Миронов [и др.] // Вестн. Технол. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 12. – С. 58–60.
2. **Mironov, M. M.** PVD barrier coatings with antimicrobial function for medical implants / M. M. Mironov, M. M. Grebenshchikova, L. T. Bayazitova // Journal of Physics: Conference Series: 11, Kazan, 05–08 novemb. 2019 г. – Kazan, 2020. – P. 012032.
3. **Миронов, М. М.** Свойства композиционных нитридных наноструктурированных покрытий и упрочнение металлообрабатывающего инструмента / М. М. Миронов, М. М. Гребенщикова // Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий (Материаловедение-2023): I Всерос. конф. с междунар. участием, Казань, 30 марта 2023 г. – Казань, 2023. – С. 231–233.

УДК 621

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ «КАРБИД ВОЛЬФРАМА – КОБАЛЬТ»  
ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВЛ. В. ДОГОТАРЬ, К. Б. ПОДБОЛОТОВ  
Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Целью работы является прямой синтез системы «карбид вольфрама – кобальт» при использовании термохимических процессов в золь-гель системе и исследование фазового состава полученного материала.

Получение твердых сплавов на основе карбида вольфрама представляет сложный процесс, состоящий из следующих стадий: синтез карбида вольфрама восстановлением вольфрамового ангидрида с помощью водорода в электрических печах и карбидизацией вольфрамового порошка сажей или углеродсодержащими газами; смешение с порошком кобальта; прессование и спекание.

Износостойкость и прочность изделий из карбида вольфрама в основном определяется дисперсностью исходного порошка. Чем меньше размер зерен порошка карбида вольфрама, тем выше износостойкость и прочность изделий. Особенно высокими характеристиками обладают изделия, изготовленные из наноразмерных, ультрадисперсных и субмикронных порошков. Задача повышения качества твердых сплавов во всем мире решается путем их наноструктурирования.

Решение проблемы наноструктурирования может быть представлено применением процесса реакционного экзотермического взаимодействия в золь-гель системах, так называемого процесса SCS (Solution Combustion Synthesis) или горения растворов. SCS включает самоподдерживающиеся окислительно-восстановительные реакции в растворе, содержащем окислителя (нитраты металлов, оксиды и др.) и восстановителя (водорастворимые органические амины, кислоты, аминокислоты и др.), смешанные на молекулярном уровне. При этом обеспечиваются уникальные характеристики продуктов, например, высокая удельная поверхность материалов вследствие большого количества газов, образующихся в процессе синтеза, образование нанокристаллического/аморфного материала в течение короткого времени и формирование хелатов/стабильных комплексов, которые в дополнение к повышенной растворимости предотвращают селективное осаждение ионов металлов во время удаления воды и способствуют образованию высокоомогенной наноструктуры конечного продукта.

В качестве исходных компонентов для синтеза применялись нитрат кобальта ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , ч), аммония паравольфрамат ( $(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}$ , ч), аминокислотная кислота (глицин,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ , хч) и лимонная кислота ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , хч).



Для реализации процесса синтеза материалов готовили реакционную систему, включающую паравольфрамат аммония и нитрат кобальта как окислитель и органическую составляющую – восстановитель. Приготовление осуществлялось растворением в воде компонентов при температуре 50 °С...60 °С и последующей сушкой раствора при температуре 100 °С. После этого реакционная система помещалась в специальную установку и для инициирования процесса синтеза производился разогрев до температур 450 °С и 1000 °С со скоростью 20 град/мин в среде инертного газа. После завершения разогрева и остывания полученные материалы анализировались методом рентгеновской дифрактометрии.

Полученные данные по фазовому составу материалов приведены на рис. 1.

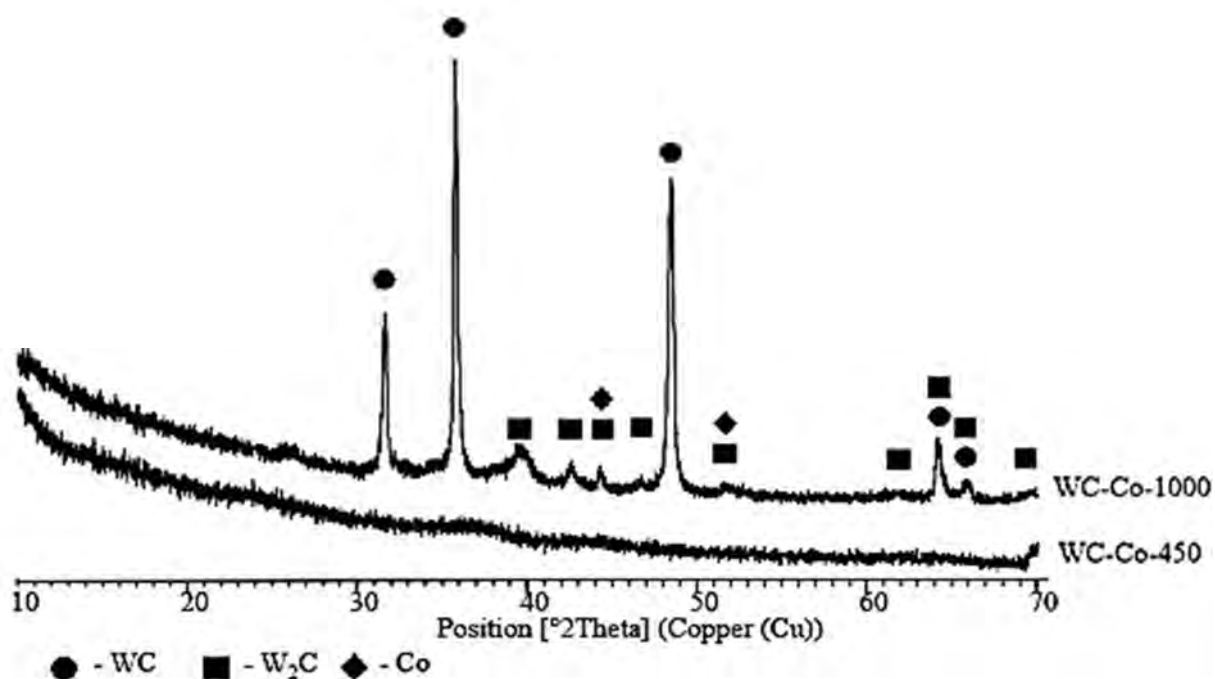


Рис. 1. Данные рентгенофазового анализа полученных материалов в зависимости от температуры синтеза

Как следует из приведенных данных, при температуре взаимодействия 450 °С полученный материал представлен рентгеноаморфной фазой, которая при дальнейшем повышении температуры до 1000 °С переходит в кристаллическую. При этом формируется материал, состоящий из карбидов вольфрама (WC, W<sub>2</sub>C) и кобальта. По данным рентгеноструктурного анализа, средний размер кристаллитов для фазы Co – 40 нм, WC – 30 нм, W<sub>2</sub>C – 15 нм.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность прямого получения наноструктурированных материалов системы «карбид вольфрама – кобальт» при использовании термохимических процессов.

УДК 621.74.04

## ПРИМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

П. Ю. ДУВАЛОВ, В. М. АНДРИЕНКО

Институт технологии металлов НАН Беларуси

Могилев, Беларусь

Оптимальным материалом для эксплуатации в условиях абразивного изнашивания является износостойкий хромистый чугун (ИЧХ), имеющий высокие показатели ударной вязкости и износостойкости. ИТМ НАН Беларуси имеет большой опыт производства деталей из ИЧХ для центробежного дробильно-размольного оборудования. Были проведены обширные научные исследования, получено семь патентов и создано три ТУ. Этот опыт был использован при производстве из ИЧХ деталей строительных смесителей, не подвергающихся ударной нагрузке. Детали из чугунов ИЧХ18ВМ, ИЧХ18ВН и ИЧХ18Г2ВМ были применены на замену стальных деталей или деталей из импортных хромистых чугунов (рис. 1).

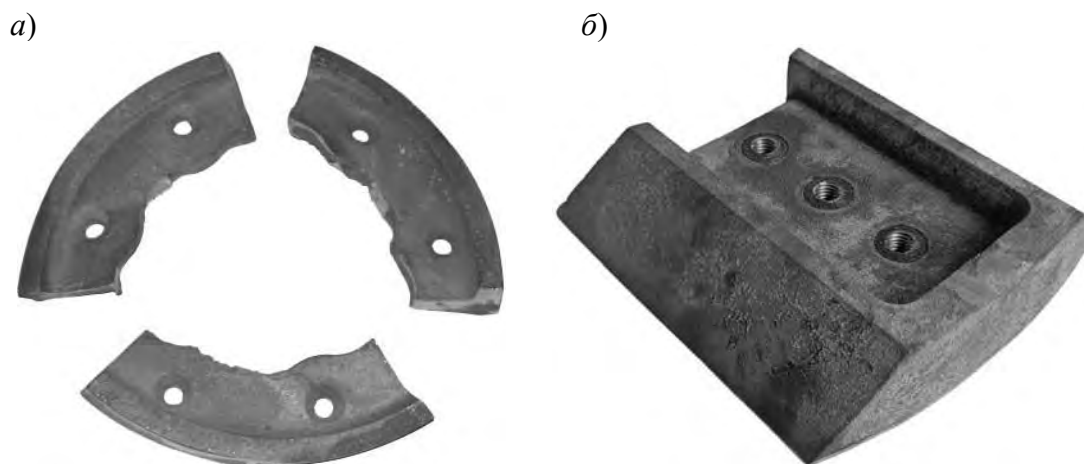


Рис. 1. Детали из хромистых чугунов для строительной отрасли: *а* – ножи шнека; *б* – лопатка смесителя

Литье таких деталей в комбинированную литейную форму, состоящую из песчаных и металлических частей, позволило увеличить твердость рабочей поверхности до 56...62 HRC без необходимости термообработки и ориентировать на глубину до 20...25 мм карбидную фазу в направлении изнашивания, что способствовало увеличению ресурса работы в 1,5–2 раза. Применение вторичного сырья позволило на 20 %...30 % снизить себестоимость производства различных лопаток смесителя. На данный момент институт работает с несколькими небольшими предприятиями по производству бетона, кирпичей, строительных смесей и производит до 1...1,5 т литья в год для данной отрасли. В дальнейшем планируется увеличение номенклатуры и объема выпуска таких деталей.

УДК 620.197:669:621.794

ПОТЕНДИОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕРНЫХ  
КЕРАМИЧЕСКИХ МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХА. Ю. КОРОЛЁВ<sup>1</sup>, Г. М. СЕНЧЕНКО<sup>2</sup>, А. Э. ПАРШУТО<sup>1</sup><sup>1</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Одной из задач современной промышленности является разработка процессов формирования черных износостойких покрытий, обеспечивающих поглощение света. Большой интерес для формирования светопоглощающих покрытий представляет метод микродугового оксидирования (МДО), характеризующийся как надежный и экологически безопасный процесс, обеспечивающий формирование твердого керамико-подобного оксидного слоя с высокой коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к основе [1].

Приводятся результаты исследования коррозионной стойкости черных керамических покрытий на алюминиевых сплавах Д16Т и АМг2, полученных методом МДО с применением силикатно-фосфатного и силикатно-щелочного электролитов.

Черные МДО-покрытия наносились на плоские образцы из алюминиевых сплавов АМг2 и Д16Т размерами 20 × 15 × 1 мм. Обработка выполнялась с применением силикатно-щелочного электролита с вольфрамом натрия следующего состава: NaOH – 0,2 %; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – 1,0 %; Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> – 1,0 % и силикатно-фосфатного электролита с ферроцианидом калия, имеющего состав: Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 1,0 %; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – 1,0 %; K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] – 1,5 %. Температура электролита при обработке образцов поддерживалась в диапазоне 20 °С...25 °С. Продолжительность обработки образцов составляла 30 мин.

Для получения поляризационных кривых использовалась трехэлектродная электрохимическая ячейка. Электрохимическая ячейка включала плоский образец, являющийся рабочим электродом, и систему измерения, состоящую из вспомогательного платинового электрода марки ЭПВ-1СР-100, хлорсеребряного электрода сравнения и электролитического ключа.

Полученные поляризационные кривые исследуемых образцов представлены на рис. 1. Значения потенциала коррозии  $E_{корр}$  и плотности тока коррозии  $i_{корр}$  были определены по пересечению линейных участков анодной и катодной кривых. Потенциалы коррозии  $E_{корр}$  исследованных покрытий (за исключением покрытия на сплаве АМг2, полученном в силикатно-щелочном электролите с вольфрамом натрия) смещаются в сторону более положительных значений, ток коррозии  $i_{корр}$  уменьшается. Для сплава Д16Т происходит увеличение значений потенциала коррозии  $E_{корр}$  с –0,730 В для исходного образца до –0,656 В для покрытия, полученного в силикатно-щелочном электролите, до –0,350 В для покрытия, полученного в силикатно-фосфатном электролите, и уменьшение плотности тока коррозии  $i_{корр}$  с  $21,38 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для исходного образца

до  $5,50 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для покрытия, полученного в силикатно-щелочном электролите, до  $18,62 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для покрытия, полученного МДО в силикатно-фосфатном электролите. Для сплава АМг2 установлено изменение значений потенциала коррозии  $E_{корр}$  с  $-0,645$  В для исходного образца до  $-0,709$  В для покрытия, полученного в силикатно-щелочном электролите, до  $-0,231$  В для покрытия, полученного в силикатно-фосфатном электролите, и снижение плотности тока коррозии  $i_{корр}$  с  $15,49 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для исходного образца до  $4,36 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для покрытия, полученного в силикатно-щелочном электролите, и до  $2,75 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для покрытия, полученного в силикатно-фосфатном электролите.

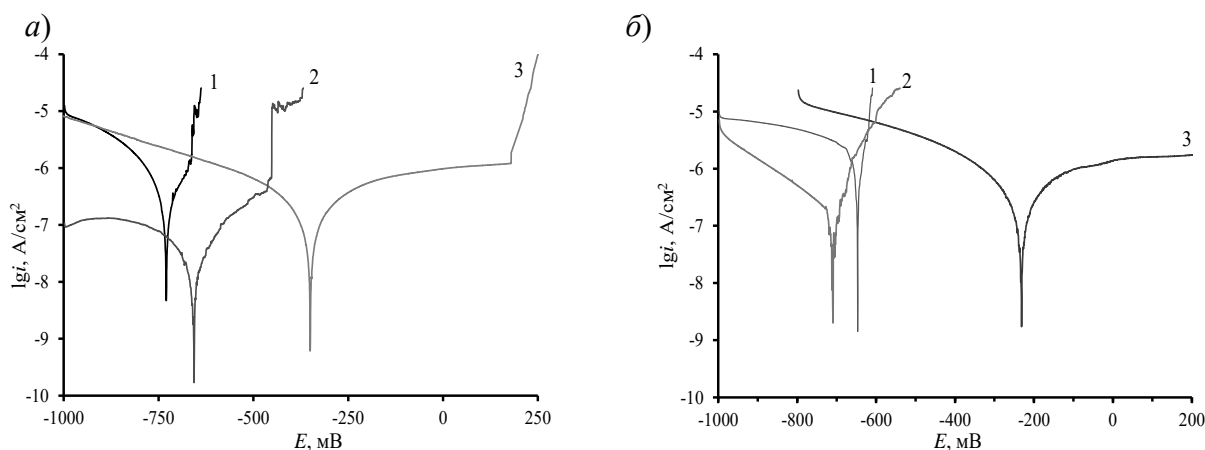


Рис. 1. Поляризационные кривые для образцов из сплавов Д16Т и АМг2: 1 – исходный образец; 2 – образец с покрытием, полученным в силикатно-щелочном электролите; 3 – образец с покрытием, полученным в силикатно-фосфатном электролите

Из полученных данных видно, что смещение потенциала коррозии образцов с покрытием аноднее потенциала коррозии исходного образца. Это говорит о том, что такие покрытия будут замедлять коррозию основного материала. В случае с образцом из АМг2 с покрытием, получаемым в силикатно-щелочном электролите, когда потенциал коррозии смещался катоднее потенциала исходного образца, будет наблюдаться увеличение скорости коррозии алюминиевого сплава.

Потенциал питтингообразования образцов из сплава Д16Т смещался в сторону положительных значений с  $-0,665$  В для исходного образца до  $-0,452$  В для покрытия, полученного в силикатно-щелочном электролите с вольфраматом натрия, и до  $+0,176$  В для покрытия, полученного в силикатно-фосфатном электролите с ферроцианидом калия, что также подтверждает влияние покрытий на повышение коррозионной стойкости. Для образцов из алюминиевого сплава АМг2 питтингообразования замечено не было.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 27–33.

УДК 691.175, 620.172

## ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ КАК ФУНКЦИЯ ПЛОТНОСТИ ABS-ПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО НАПЛАВЛЕНИЕМ НИТЕЙ

И. А. ЛЕОНОВИЧ, Д. Д. АДИНЦОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Цель работы – выявить зависимость между пределом прочности ABS-пластика, полученного наплавлением нитей, от плотности материала при разном характере заполнения объема.

Исследования проводились на крупноразмерных образцах, изготовленных по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012) *Пластмассы. Метод испытания на растяжение* (тип 1В).

Образцы изготавливались методом наплавления нитей (FFF/FDM-печать) на 3D-принтере VSHAPER PRO из проволоки ABS-s21 диаметром 1,75 мм. Исследовались два стиля заполнения («линии» и «сетка») в трех вариантах плотности укладки нитей: 100 %, 90 %, 80 %. При печати материал образует не совсем равномерную структуру: для всех вариантов формируется внешний плотный каркас, который заполняется в заданном стиле и с заданной плотностью заполнения. Поэтому решено было учитывать среднюю плотность материала, опираясь на объем виртуального образца с соответствующей корректировкой пропорционально реальной площади поперечного сечения в пределах допустимой погрешности. Испытание на растяжение проводилось на универсальной машине Kason WDW-5 при скорости 1 мм/мин. На рис. 1 показаны полученные зависимости между пределом прочности при растяжении ABS-пластика и его средней плотностью. Обработка экспериментальных данных позволила получить линейные уравнения регрессии, адекватные при 95-процентной доверительной вероятности.



Рис. 1. Зависимость предела прочности при растяжении от плотности ABS-пластика, полученного наплавлением нитей

УДК 691.175.5/8

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ФОТОПОЛИМЕРА GREY V4 ОБРАЗЦОВ

И. А. ЛИСОВАЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Большинство фотополимеров, применяемых в 3D-печати, можно значительно улучшить благодаря дополнительному отверждению в ультрафиолетовой камере. Качественно выполненное постотверждение – это быстрый и простой способ повысить качество деталей.

В данном исследовании изучена зависимость твердости Тв и мгновенной твердости МТв образцов, изготовленных на принтере FORMLAB-3 из фотополимера Grey V4, от времени выдержки в ультрафиолете УФ 30 и 60 мин соответственно по сравнению с Тв и МТв образцов без УФ-полимеризации. Контрольные точки – день полимеризации, 1-е, 2-е, 3-и, 6-е, 8-е, 10-е и 14-е сутки соответственно.

В эксперименте использовали твердомер (дюрометр) по Шору модификации ТВР-АМ, при этом были соблюдены необходимые условия проведения контроля твердости, а также требования к внешним условиям, к контролируемому изделию, к количеству и результатам измерений.

Уже в первый день испытаний Тв образцов после 60-минутной полимеризации превышала таковую образцов без полимеризации на 15 % (70 и 60 ед. соответственно), и данная тенденция сохранялась на протяжении первых трех суток эксперимента.

При сопоставлении результатов Тв для образцов без полимеризации в точках 1-е, 3-и, 8-е и 10-е сутки можно констатировать поступательное увеличение этого показателя с достижением максимального значения на 10-е сутки испытаний.

Четкой корреляции между значениями твердости для образцов с 30-минутной выдержкой в ультрафиолете и временем испытания не зарегистрировано при одинаковом отклонении значений в точках 2-е и 8-е сутки, однако максимум приходится на временной показатель 10 суток.

При сравнении значений твердости для образцов с 60-минутной выдержкой в ультрафиолете в точках день испытаний, 3-и и 6-е сутки фиксируется увеличение данного показателя с максимальным значением в точке 6-е сутки эксперимента.

Таким образом, только на 14-е сутки эксперимента Тв образцов без полимеризации приближается по значениям к Тв образцов с 30- и 60-минутной выдержкой в ультрафиолете, при этом оставаясь ниже значений Тв на 3 и 4 ед. Тв по шкале Шора соответственно.

УДК 621.762

## ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

И. А. ЛОЗИКОВ, АН ЙИН, А. Д. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Основными физическими свойствами, которыми должны обладать контактные материалы, являются: высокая электро- и теплопроводность; высокая температура плавления и кипения; низкая упругость паров и высокая теплоемкость; высокие критические значения силы тока и напряжения; высокая работа выхода электронов; высокое значение коэффициента поверхностного натяжения на границе «жидкий металл – газ». К основным механическим свойствам относятся высокие характеристики прочности, пластичности и вязкости как при низких температурах, так и при высоких. Материал должен обладать следующими химическими свойствами: высокой коррозионной стойкостью в различных средах и в широком диапазоне температур; малой склонностью к растворению газов; иметь высокую летучесть окислов и высокое значение электрохимического потенциала. Перечисленные свойства определяют электроконтактные характеристики: высокую дугостойкость; отсутствие склонности к свариванию; низкое контактное и переходное сопротивление; хорошую прирабатываемость. Дополнительным требованием, предъявляемым к материалам скользящих контактов, являются высокие антифрикционные свойства. Материалы щеток должны обеспечить длительную работу узла в условиях трения скольжения до  $50 \text{ мс}^{-1}$  без схватывания и возникновения электрических шумов. Это возможно только при образовании рабочей пленки, обеспечивающей эффект смазки и беззадирное требование.

Ни одно из природных веществ и созданных конструкционных материалов не обладают комплексом перечисленных свойств. Их могут обеспечить композиционные материалы, сочетающие свойства составляющих их компонентов. Основным способом производства композиционных материалов является порошковая металлургия. По ряду физических и химических свойств наибольший интерес представляют материалы на основе таких металлов, как Ag, Au, Pt, Pd, Cu.

Основной причиной износа контактов является дуговой разряд, возникающий между ними в процессе эксплуатации. Поэтому те элементы, для которых значения критической силы тока и критического напряжения при образовании дуги выше, более пригодны для изготовления контактов и будут обладать большей износоустойчивостью. Исходя из анализа критической силы тока при дугообразовании при различных величинах напряжения для металлов, представленной в табл. 1, к ним относятся тугоплавкие элементы и серебро. Тугоплавкие металлы, такие как вольфрам и молибден, обладают рядом ценных свойств, важных для их использования в контактах: высокие показатели температуры плавления, прочности, температуры испарения. Вместе с тем они имеют низкие теплопроводность и электропроводность. Поэтому в качестве

второго компонента применяют медь или серебро, которые нивелируют эти отрицательные свойства тугоплавких металлов.

Табл. 1. Величина критической силы тока при дугообразовании

Материал	Напряжение, В				Материал	Напряжение, В			
	25	50	110	220		25	50	110	220
Графит	–	5,0	0,7	0,1	Медь	–	1,3	0,9	0,5
Молибден	18	3,0	2,0	1,0	Никель	–	1,2	1,0	0,7
Вольфрам	12,5	4,0	1,8	1,4	Кадмий	0,5	0,5	0,5	0,5
Серебро	1,7	1,0	0,6	0,25	Свинец	7,5	3,0	2,0	1,0

Номенклатура современных спеченных контактов является довольно широкой. В табл. 2 представлены химические составы современных контактных материалов для различных коммутирующих аппаратов, нашедших применение на территории стран СНГ.

Табл. 2. Химические составы современных контактных материалов

Контакт	Марка контакта	Химический состав, %
Серебряно-никелевые	СН-15; СН-30; СН-40; СН-45	Серебро – основа, никель – 15...45
Серебряно-кадмиевые	СОК-8; СОК-12; СОК-15	Серебро – основа, СсЮ – 8...15
Серебряно-графитовые	СП.2; СП-3; СП-5	Серебро – основа, графит – 2...5
Серебряно-вольфрамовые	СВ-30; СВ-50; СВ-60; СВ-65; СВ-75; СВ-85	Вольфрам – 30...85, серебро – 70...15
Серебряно-молибденовые	СМ-30; СМ-60; СМ-65; СМ-70; СМ-75; СМ-80	Молибден – 30...80, серебро – 70...20
Серебряно-медные	ОМ-10	Серебро – 90, медь – 10
Серебряно-свинцовые	ОС-3; ОС-5	Серебро – 97...95, PbO <sub>2</sub> – 3...5
Медно-графитовые	МГ-6	Медь – 95, графит – 5
Карбидо-серебряные	СКВ-50; СКВ	WC – 50...65, серебро – 50...35
Карбидо-медные	МКВ-80	WC – 80, медь – 20
Вольфрамо-медные	МВ-20; МВ-40; МВ-60; МВ-80	Вольфрам – 40...80, медь – 60...20

Материалы, производимые для этой цели за рубежом, аналогичны вышеприведенным.

Кроме вышеуказанных контактов, применяют также контакты из чистого серебра, сплава серебра с палладием. Их изготавливают в виде пластин, дисков и прутков и применяют в основном в слаботочных приборах в виде разрывных и скользящих контактов.

Анализ вышеприведенных данных показывает, что круг материалов, которые могут применяться для изготовления контактов низковольтных коммутирующих устройств, крайне ограничен. Для этой цели используются в основном материалы марки СОК и СК, представляющие собой системы «серебро – оксид кадмия» и «серебро – оксид свинца». Применение новых технологий и реакционного механического сплавления в частности может позволить не только расширить круг материалов, но и получать сплавы с повышенным комплексом свойств и эксплуатационных характеристик.



УДК 621.762

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ

И. А. ЛОЗИКОВ, АН ЙИН, Д. С. МАХНОВЕЦ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Контактные материалы являются, как правило, композиционными, и технология их изготовления основана на методах порошковой металлургии. Наиболее широкое применение получили два варианта.

Сущность первого варианта технологии заключается в перемешивании всех исходных компонентов в соответствующих смесителях, холодном прессовании полученной шихты в изделия необходимой формы и спекании сформованных изделий при температуре, несколько превышающей температуру плавления наиболее легкоплавкого компонента. Этот вариант технологии является основным и наиболее широко используется в промышленности.

Сущность второго варианта технологии заключается в холодном прессовании порошка тугоплавкого компонента, его низкотемпературном спекании и пропитке пористого тугоплавкого тела серебром или медью. Технологию изготовления методом пропитки применяют для изготовления контактов, основанных на системах W–Cu, W–Ag, Mo–Cu, Mo–Ag. Этот вариант обеспечивает получение более прочных и более износоустойчивых контактов. Для улучшения пропитки к порошку тугоплавкого металла добавляют небольшое количество порошка того металла, которым пропитывается скелет из тугоплавкого металла. Пропитку медью осуществляют обычно при 1200 °С и серебром при 1100 °С.

Этот процесс ведут при нагреве до необходимой температуры пористых заготовок из тугоплавкого металла в печи с защитной атмосферой. На пористую заготовку укладывают кружок или пластинку из меди или серебра. Процесс пропитки начинается с момента их расплавления.

По другому варианту осуществляют окунание пористых заготовок в расплавленное серебро или медь. Этот вариант требует последующей механической обработки контактов.

Требованиям, предъявляемым к контактными сплавам, в наиболее полной мере отвечают спеченные материалы, представляющие собой псевдосплавы серебра с тугоплавкими металлами, в частности вольфрамом, причем тугоплавкий компонент образует каркас.

Делаются попытки по освоению технологии получения контактов из дисперсно-упрочненного серебра [1]. Отличительной особенностью ее является то, что исходную шихту получают не простым смешиванием порошкообразных компонентов, а осаждением из водных растворов азотнокислых солей. Так, для получения смеси Ag–CdO применяют сложный водный раствор азотнокислых солей серебра и кадмия, на который воздействуют едким натром. При этом в осадок выпадают соответствующие гидраты серебра и кадмия. Осадок

промывают, сушат и прокаливают при 400 °С...500 °С. При этом образуется весьма однородная смесь высокой дисперсности. Контакты, изготовленные из такой смеси, обладают повышенной износостойкостью, которая возрастает с увеличением дисперсности компонентов порошковой композиции.

В [2] приведены результаты изучения контактов «серебро – никель», полученных из шихты, изготовленной совместным осаждением из растворов смеси оксалатов серебра и никеля с последующим их разложением при прокаливании (400 °С...450 °С) и восстановлением. Показано, что такой способ образования шихты обеспечивает получение контактов более высокого качества, чем из смеси, полученной механическим смешением порошков, или из смеси, полученной из растворов азотнокислых солей.

По данным в [3], перспективным является композиционный слоистый материал, представляющий собой медь, покрытую слоем композиции W–Ni–Cu или W–Ni–Ag толщиной до 3 мм. Применение таких материалов обеспечивает хороший теплоотвод от рабочей поверхности, уменьшение эрозии и, как следствие, повышение срока службы контактов.

Применение меди в качестве основы контактных материалов в связи с более низким, по сравнению с серебром, комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств крайне ограничено. Известны псевдосплавы меди М5-3 и М5-5, содержащие 3 % и 5 % графита соответственно, которые применяются для изготовления контактов в слабонагруженных и имеющих малое количество срабатываний выключателях, ручных рубильниках, контакторах.

Все параметры меди, за исключением электропроводности, определяющие электроконтактные характеристики, могут быть улучшены путем разработки новых способов получения и методов упрочнения, позволяющих при небольшом объеме специальных избыточных фаз, образующихся в процессе реализации технологии реакционного механического сплавления, что сводит к минимуму их негативное влияние на электропроводность, достичь оптимальных параметров структуры и свойств. Это должно обеспечить создание медных материалов, которые по своим свойствам не уступают серебряным.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малащенко, И. П. Труды VIII Всесоюзной конференции по порошковой металлургии / И. П. Малащенко, К. В. Рубарь, В. А. Бродов. – Минск: Вышэйшая школа, 1966. – С. 306–311.
2. Колосников, Н. В. Получение новых электрических контактов системы «серебро – никель» / Н. В. Колосников, Б. А. Юдин, В. П. Корниенко // Порошковая металлургия. – 1974. – № 8. – С. 36–40.
3. Левченко, Г. В. Новый композиционный материал для электрических контактов: сб. тр. совещания по электротехническим материалам / Г. В. Левченко. – Москва: ВНИЭМ, 1965. – С. 79–87.

УДК 621.762

## РЕЦИКЛИНГ ОТРАБОТАННЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ВАКУУМНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

А. Р. ЛУЧЕНОК, Л. В. СУДНИК, А. С. ВАНЬКОВИЧ, В. С. ТКАЧУК  
ОХП «Научно-исследовательский институт импульсных процессов  
с опытным производством» Института порошковой металлургии  
имени академика О. В. Романа  
Минск, Беларусь

Для вакуумного напыления различных функциональных покрытий в настоящее время используются композиционные металлические и керамические мишени широкой номенклатуры составов и размеров.

Специфика работы и конструктивные особенности вакуумных напылительных систем приводят к тому, что мишени для распыления изнашиваются неравномерно. Полностью изношенная мишень, как правило, содержит до 30 %...50 % неиспользованного дорогостоящего материала. Значительный диапазон применяемых в тонкопленочной технологии составов и типоразмеров мишеней определяет актуальность повторного использования дорогостоящих материалов отработанных мишеней.

В настоящее время разработан ряд технологических приемов повторного использования материалов отработанных мишеней и катодов. Разработанные технологии успешно используются для рециклинга мишеней и катодов из цветных металлов и сплавов – метод переплава и литья. Используются также методы традиционной порошковой металлургии.

Применение традиционных методов порошковой металлургии позволяет получать высокоплотные прессовки из отработанных мишеней после измельчения материалов отработанных мишеней в порошок.

Однако для достижения высокой плотности прессовок, получаемых традиционными методами порошковой металлургии, как правило, требуется применение высокодисперсных исходных порошков и связующих веществ, что усложняет переработку материалов отработанных мишеней. Велика вероятность внесения примесей в процессе тонкого помола и введения связки в порошок.

Метод импульсного прессования порошков (с использованием энергии взрывчатых веществ) позволяет получать высокоплотные качественные изделия из порошков с размерами частиц до 1000...3000 мкм, что дает возможность отказаться от операции тонкого помола.

Проведенные ранее работы [1] показали, что гранулометрический состав шихты для прессования мишеней из резистивного сплава на основе силицида хрома определяет термическую стойкость мишени в процессе эксплуатации.

На основе экспериментальных данных был определен оптимальный гранулометрический состав порошковой шихты, полученной размолотом отработанных мишеней из материала на основе силицида молибдена. Технология защищена патентами Республики Беларусь [2, 3].

После размолотом отработанных мишеней для материала на основе силицидов молибдена готовилась шихта для прессования путем смешивания отсева фракций порошков от 315 до 1600 мкм и меньше 160 мкм в соотношении 2 : 1. Порошки смешивались в смесителе со смещенной осью в течение 0,5 ч.

Прессование заготовок мишеней проводилось по плоской схеме с линейным фронтом детонации при высоте заряда ВВ (аммонит № 6ЖВ) 35 мм.

Были получены заготовки мишеней с относительной плотностью порядка 88 %.

Прессовки, полученные из шихты на основе силицида молибдена разработанного фракционного состава, имеют разнородную градиентную структуру, представляющую собой основу из крупных частиц, промежутки между которыми заполнены мелкими частицами. Такое градиентное строение материала обуславливает образование большого числа микродефектов, обеспечивающих оптимальное распределение напряжений, и значительно уменьшает чувствительность мишеней к термическим нагрузкам. Это позволяет использовать мишень с большой распыляемой площадью, увеличить срок службы мишени, скорость напыления и производительность процесса.

Спекание прессовок проводилось в вакуумной печи СНВ-1.3.1/20И1 при температуре 1000 °С. Выдержка на режиме 1,5 ч; охлаждение вместе с печью.

Плотность мишеней из материала на основе силицида молибдена после прессования и спекания составила 88 %...89 %.

С использованием разработанной технологии освоено производство мишеней для вакуумного распыления размером до 445 × 125 × 8 мм из различных сплавов на основе силицидов тугоплавких металлов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработать многокомпонентные материалы и оборудование для изготовления мишеней повышенной степени чистоты с использованием импульсных методов нагружения и организовать их опытно-промышленное производство: отчет о НИР (заключ.): 88–89 / ОХП НИИ импульсных процессов с опытным производством: рук. Г. В. Смирнов; исполн.: А. Р. Лученок, А. А. Волочков, Н. В. Киршина, А. А. Лученок. – Минск, 2009. – 103 с. – № ГР 20065530.

2. Способ изготовления резистивных мишеней: пат. ВУ 15571 / А. Р. Лученок, А. Ф. Ильющенко, А. А. Лученок, Н. В. Киршина, Л. В. Федулаева, Л. С. Шац.

3. Способ изготовления резистивных мишеней: пат. ВУ 15571 / А. Р. Лученок, А. Ф. Ильющенко, А. А. Лученок, Н. В. Киршина, Л. В. Федулаева, А. В. Горюнов, И. И. Резчикова.

УДК 667.6

## ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ

Е. Е. ЛУЧКИНА, М. В. СЛОБОЖАНИНОВА, Ю. В. КАРАЕВА

ФИЦ «Казанский научный центр РАН»

Казань, Россия

Покрyтия на основе эпоксидной смолы достаточно распространены в современном мире. Они применяются в автомобильной, морской, электронной, строительной, металлообрабатывающей и других областях промышленности. Благодаря хорошим адгезионным свойствам, долговечности, прочности, а также химической и термостойкости покрытия используются для защиты различных поверхностей, которые подвержены коррозии, разнообразным формам износа или химическим реакциям. Кроме того, эпоксидные покрытия защищают материал от разрушающего воздействия некоторых веществ, а также используются в декоративных целях [1].

Несмотря на успешное применение в разнообразных сферах, эпоксидные покрытия имеют некоторые недостатки, ограничивающие их активное использование. Во-первых, данные покрытия обладают сильно сшитой структурой, из-за чего возникают трещины, которые затем могут быстро распространяться. Во-вторых, покрытия постоянно подвергаются повреждениям из-за поверхностного истирания и износа. Результатом данных процессов является образование дефектов в покрытии, а главное – снижение его прочности. В связи с этим актуальной задачей является совершенствование технологии получения эпоксидных покрытий с целью улучшения их качества и повышения эксплуатационных свойств.

Усовершенствовать технологию получения можно путем полной или частичной замены модификатора в классической рецептуре на смолистую фракцию жидких продуктов пиролиза древесины (бионефть) [2]. Такая замена позволит повысить прочностные свойства эпоксидного покрытия. Следует также отметить, что замена обычного модификатора на бионефть позволит получить высокоэффективное эпоксидное покрытие на биологической основе, что является немаловажным, поскольку в последнее время наблюдается развитие «зеленых» полимеров и материалов, которые снижают загрязнение окружающей среды.

Для проведения исследования были подготовлены три образца эпоксидных покрытий, отличающихся компонентным составом. Покрытие 1 изготовлено по классической рецептуре, включающей связующее – эпоксидную смолу ЭД-20, модификатор дибutilфталат (ДБФ) и отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА). Рецептура покрытия 2 отличается тем, что классический модификатор частично заменен на бионефть, а в покрытии 3 классический модификатор полностью на неё заменен.

Покрyтие наносили на предварительно очищенную стеклянную пластинку и отверждали при комнатной температуре в течение суток. Толщина покрытий составляла 0,7 мм.

Для оценки твёрдости полученных образцов использовали маятниковый метод. Измерения проводили на маятниковом приборе типа М-3. Результаты испытания представлены на рис. 1.

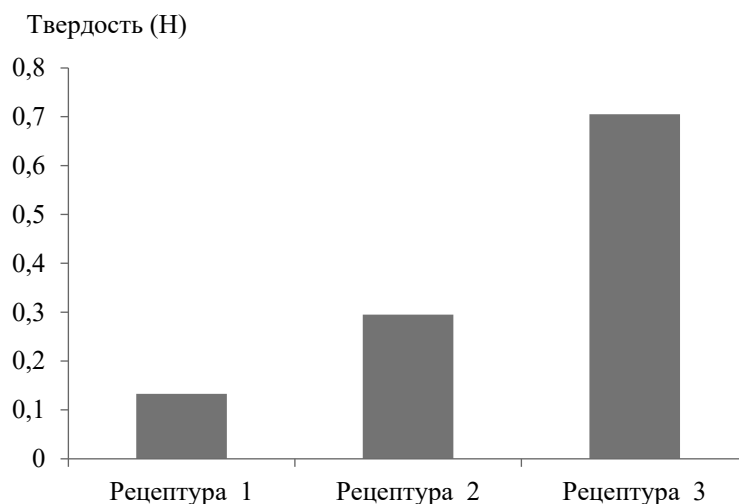


Рис. 1. Твердость эпоксидных покрытий исследуемых образцов

Согласно рис. 1 имеем следующее.

Рецептура 1 – классическая: ЭД-20 (80 м. ч.) + ДБФ (20 м. ч.).

Рецептура 2 – частичная замена классического модификатора: ЭД-20 (80 м. ч.) + ДБФ (10 м. ч.) + Бионефть (10 м. ч.).

Рецептура 3 – полная замена классического модификатора: ЭД-20 (80 м. ч.) + Бионефть (20 м. ч.).

Результаты проведенного исследования показали, что показатель твердости при использовании бионефти в качестве модификатора резко возрастает и её применение может быть рекомендовано для усовершенствования технологии и получения новых эпоксидных материалов и покрытий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baig, M. M. A.** Epoxy\Epoxy Composite\Epoxy Hybrid Composite Coatings for Tribological Applications - A Review / M. M. A. Baig, M. A. Samad // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 179–206.

2. **Сидоркина, О. А.** Использование возобновляемого сырья в эпоксидных материалах как экологичная альтернатива нефтехимическим продуктам / О. А. Сидоркина, М. В. Слободжанинова, Е. Е. Лучкина // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Нац. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов*. – Тюмень: Тюмен. индустриальный ун-т, 2023. – С. 238–240.

УДК 621.794.61

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РЕЖИМАХ  
МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯВ. С. НИСС<sup>1</sup>, А. Э. ПАРШУТО<sup>2</sup>, Е. В. СОРОКА<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Беларусь

Для повышения производительности с возможностью управления структурой и свойствами формируемых оксидных слоев предложен метод микродугового оксидирования, основанный на использовании полностью управляемых по амплитуде и длительности разнополярных импульсов напряжением до 600 В с регулируемой частотой от 50 до 2500 Гц. Исследовалось влияние периода импульсов (частоты) и радиуса кривизны обрабатываемых цилиндрических поверхностей на толщину, шероховатость, микротвердость формируемого оксидного слоя и прирост массы образцов. Использовались электроды-образцы различного диаметра – 10, 20, 30 мм и высотой 10 мм из алюминиевого сплава Д16Т.

Обработка образцов выполнялась в водном растворе КОН (0,3 % масс.) и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (0,9 % масс.). Температура электролита составляла 25 °С. Для обработки использовались биполярные импульсы с длительностью 0,25...2,0 мс (период 1...8 мс) в форме меандра с коэффициентом заполнения 50 %. Амплитуда импульса положительного напряжения составляла 500 В, отрицательного – 160 В. Для сравнительной оценки характеристик покрытий на цилиндрических поверхностях, полученных при высокочастотных режимах, дополнительно выполнялась обработка образцов на традиционно применяемом в процессах микродугового оксидирования тиристорном источнике питания с фазовым регулированием напряжения, формирующим импульсы с частотой 50 Гц (период 20 мс). Обработка на тиристорном источнике питания выполнялась при тех же значениях амплитуд положительного и отрицательного импульса.

Зависимости толщины, микротвердости, шероховатости оксидного слоя и изменения массы от периода импульсов для образцов различного диаметра представлены на рис. 1–3. При использовании высокочастотных режимов толщина формируемого оксидного слоя зависит от периода импульсов (см. рис. 1). При этом диаметр образца не оказывает значимого влияния на толщину слоя. При значении периода 1 мс (длительность импульса 0,25 мс) толщина оксидного слоя составляет 30...37 мкм, а при периоде 8 мс – 160...163 мкм. При использовании тиристорного источника питания с периодом импульсов 20 мс (частота 50 Гц) толщина оксидного слоя для образцов различного диаметра составляет 74...99 мкм.

Период импульсов также оказывает существенное влияние на микротвердость формируемого оксидного слоя (см. рис. 2). Как и в случае с толщиной формируемого слоя, диаметр обрабатываемого образца не оказывает значимого влияния на микротвердость. При периоде 1 мс микротвердость оксидного слоя

составляет HV 1172...1222, а при периоде 8 мс HV 1700...1886. При периоде импульса 20 мс (тиристорный источник питания) микротвердость оксидных слоев зависит от диаметра электрода и составляет около HV 1600 для образцов диаметром 10...20 мм и HV 1404 для образца диаметром 30 мм.

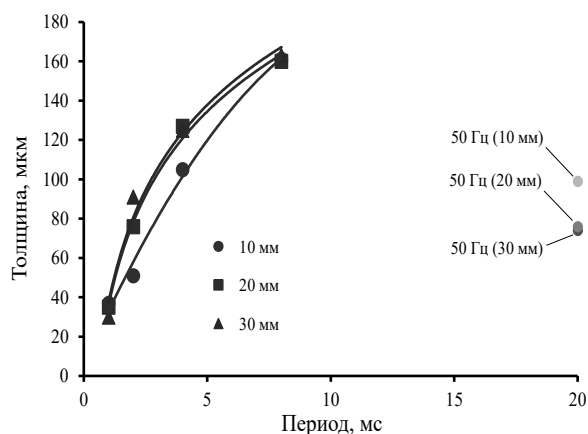


Рис. 1. Зависимости толщины оксидного слоя от периода импульсов для образцов различного диаметра

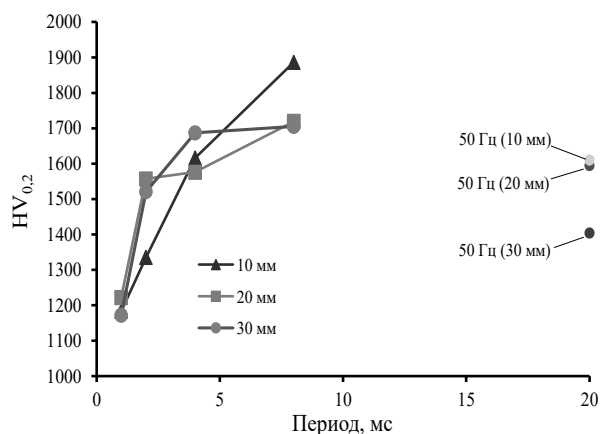


Рис. 2. Зависимости изменения микротвердости оксидного слоя от периода импульсов для образцов различного диаметра

Диаметр образца оказывает существенное влияние на прирост массы образцов (см. рис. 3). Так, при периоде 1 мс изменение массы оксидного слоя составляет 0,4 %...0,5 % при диаметре 20...30 мм и 1,1 % при диаметре 10 мм. При периоде 8 мс прирост массы увеличивается до 1,5 %...1,9 % для образцов диаметром 20 и 30 мм и до 4,8 % для образца диаметром 10 мм. При обработке на тиристорном источнике питания наибольший прирост массы (3,8 %) также обеспечивается для образца диаметром 10 мм. Для образцов диаметром 20 и 30 мм изменение массы составляет 1,1 %...1,4 %.

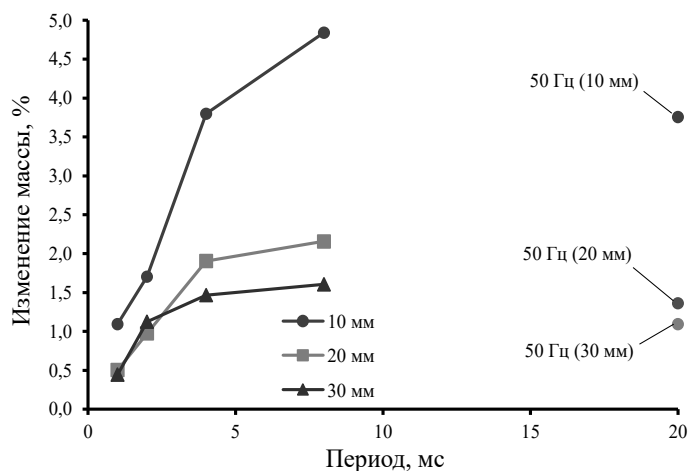


Рис. 3. Зависимости изменения массы оксидного слоя от периода импульсов для образцов различного диаметра



УДК 621.45.038.7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙЕ. В. ОВЧИННИКОВ, В. В. МИХАЙЛОВ, А. Ч. СВИСТУН,  
Д. А. ЛИННИК, А. Е. ОВЧИННИКОВГродненский государственный университет имени Янки Купалы  
Гродно, Беларусь  
Институт прикладной физики АН Молдовы  
Кишинева, Молдова

Технологию электроискрового легирования с образованием защитных слоев предложили Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Технология ЭИЛ относится к высокоэнергетическим импульсным процессам. Суть метода заключается в том, что в результате прохождения между электродами электрических импульсов определенных параметров происходит направленный выброс материала электродов. Такой процесс деструкции поверхностных слоев электродов при образовании между ними искрового разряда традиционно называют электрической эрозией. Согласно классическим представлениям и имеющимся в научной литературе данным установлено, что в ходе данного процесса преимущественно разрушается анод. Процесс электроискрового легирования происходит обычно в газовой среде, что приводит к тому, что при заданных условиях материал анода, находящийся обычно в виде паровой или жидкой фаз, наносится на катод. В результате взаимодействия наносимого материала с материалом катода и окружающей средой на катоде образуется слой с заданными физико-механическими свойствами. Обычно полученный защитный слой имеет сложный состав и может содержать не только материал анода, но и твердые растворы, химические соединения, наночастицы, нанофазы, различные сплавы и псевдосплавы.

Одной из основных проблем данной технологии является то, что при достижении какой-то критической толщины покрытия прекращается процесс увеличения ее, а при дальнейшем продолжении электроискровой обработки поверхности происходит съем поверхностных слоев ЭИЛ покрытия. В связи с этим разрабатываются теоретические, технологические, практические подходы для объяснения природы этого явления и решения на уровне технологии возможности обойти данный процесс. Одной из теорий, объясняющих ограничение по толщине электроискровых покрытий, является процесс взаимодействия газовой среды с элементами расплавленного металла. Проведенные исследования показали, что в инертной среде возможно несколько увеличить толщину слоя. Однако, как и в случае формирования электроискровых покрытий в воздушной среде, кривые зависимости увеличения массы катода не отличались по характеру от кривых привеса катодов в инертной среде. Согласно данным, полученным А. Д. Верхотуровым, исследовавшим влияние окружающей среды на происходящие физико-механические процессы при протекании процессов электроискрового легирования стальных субстратов переходными металлами в

азоте, аргоне, на воздухе, нефтяном масле, углекислом газе, причиной ограничения по толщине получаемых слоев является целый комплекс характеристик этих покрытий физико-химического и механического характера. Показано, что значительные внутренние напряжения, возникающие в покрытии при достижении некоторой определенной величины по толщине, могут привести к разрушению данного слоя. Решением данных проблем является использование методов формирования защитных покрытий с помощью порошковых материалов. Развитием теоретических подходов применимости электроискрового легирования порошковыми материалами стали различные вариации теории гидродинамической модели искрового разряда, что позволило получить выражение для радиуса и скорости ударной волны, радиуса и скорости искрового канала, причем в данном случае учитываются процессы ионизации, диссоциации газовой среды, в которой происходит искровой разряд. Полученные уравнения связывают пространственно-временные характеристики искрового канала с количеством энергии, выделяющейся в нем. Величины  $R$ ,  $D$ ,  $r$ ,  $dr/dt$  определяются из следующих выражений:

$$R(t) = K \left[ \int_0^t E^{\frac{1}{2}}(t) dt \right]^{1/2}; \quad (1)$$

$$D(t) = \frac{K}{2} E(t)^{1/2} \left[ \int_0^t E(t)^{\frac{1}{2}} dt \right]^{-\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$$r(t) = L \left\{ E(t)^M \left[ \int_0^t E(t)^{1/2} dt \right]^N \right\}; \quad (3)$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = LE(t)^{M-1} \left[ \int_0^t E(t)^{1/2} dt \right]^N \left\{ ME(t) + NE^{\frac{1}{2}}(t) \left[ \int_0^t E(t)^{1/2} dt \right]^{-1} \right\}, \quad (4)$$

где  $E(t)$  – общее количество энергии, выделившееся в единице длины канала к моменту времени  $t$ ;  $L$ ,  $M$ ,  $N$  – постоянные, относящиеся к уравнению состояния газа, которые могут быть вычислены для конкретного газа и давления.

В ряде работ было предложено рассмотреть влияние магнитных сил, возникающих при разряде, на развитие канала искры и установлено, что для характерных значений магнитного поля и плотности в канале в промежутке времени  $t = 10^{-7} \dots 10^{-6}$  с можно пренебречь как магнитными силами, так и влиянием магнитного поля на кинетику электронов. В результате получена формула, достаточно простая для вычисления  $r$ :

$$r = 0,93 \rho_0^{-1/6} I^{1/3} t^{1/2}, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус канала;  $I$ , кА;  $t$ , мкс.

За единицу плотности  $\rho_0$  взята плотность воздуха при атмосферном давлении  $1,29 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. В случае коротких разрядов  $U_0/L \approx 10^{12}$  А/с;  $U_0$  – напряжение пробоя;  $L$  – индуктивность контура. Скорость поступления энергии в канал искры ограничена не индуктивностью разрядной цепи, а собственным сопротивлением канала. Данный подход дает хорошее совпадение с экспериментальными данными только для первой четверти колебания тока. Это объясняется тем, что не вся энергия, которая выделяется в канале искры, расходуется на образование ударной волны и расширения канала.

*Исследования проведены в рамках проекта Т22МЛДГ-004.*

УДК 623.438

## СПОСОБ СОЗДАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ БРОНЕЭЛЕМЕНТОВ

А. П. ПИЛИПЧУК<sup>1</sup>, С. М. КОНДРАШУК<sup>1</sup>, А. А. МИШИН<sup>2</sup><sup>1</sup>Военная академия Республики Беларусь<sup>2</sup>Белорусская государственная академия авиации

Минск, Беларусь

В настоящее время возрастает роль динамических воздействий в процессе эксплуатации различных устройств, в частности высокоскоростного взаимодействия с поражающими элементами. Решение задачи определения результата высокоскоростного взаимодействия имеет важное прикладное значение при проектировании объектов средств бронезащиты [1, 2]. Необходимо отметить постоянное совершенствование средств поражения, одним из проявлений которого можно считать использование высокопрочных материалов (сплавы ВК и инструментальные стали) для пуль повышенной пробиваемости. Для защиты военной техники успешно применяются броневые стали, обеспечивающие защиту от всех видов стрелкового оружия. Однако по причине значительной массы данные материалы находят ограниченное применение в конструкции современных средств индивидуальной бронезащиты. Отмеченное обстоятельство определяет необходимость создания различных новых защитных структур с улучшенными свойствами.

Одним из вариантов перспективного материала является дискретная (дисперсная) броня [2–5]. В данной конструкции первый слой (дробяще-отклоняющий) представляет собой мозаику из керамических элементов, связанных между собой полимером, нижний (задерживающий) слой выполнен из арамидной ткани и металла (рис. 1).

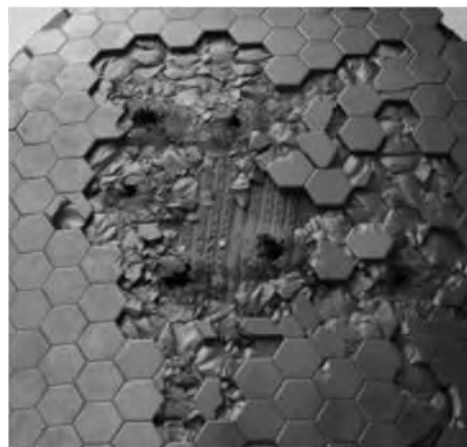


Рис. 1. Бронезащитные элементы различных конфигураций

При ударе в отдельный керамический фрагмент поражающий элемент деформируется, частично разрушается и теряет значительную часть своей кинетической энергии. В результате фрагменты поражающего элемента и керамики задерживаются последующим нижним слоем. Защитный эффект в

этом случае достигается не за счёт упрочнения брони, а в результате рассеивания энергии поражающего элемента. Важными преимуществами дискретной брони являются высокая живучесть, при которой количество допустимых попаданий на единицу площади сравним с аналогичными показателями стальной брони, и высокая ремонтпригодность, позволяющая производить быстрое и простое устранение боевых повреждений [3, 4].

В результате выполненных исследований обоснован облик гибридного материала, стойкого к ударным воздействиям, состоящего из не менее двух слоев. При этом каждый слой состоит из множества элементов с высокой твердостью (60...62 HRC) в форме квадрата или правильного шестигранника, уложенных в виде мозаики в ячейки металлической плиты (рис. 2, а) или закрепленных на плоскости клеевой композицией (рис. 2, б). Для обеспечения сплошной защиты каждый последующий слой смещен в плоскости относительно предыдущего на заданную величину.

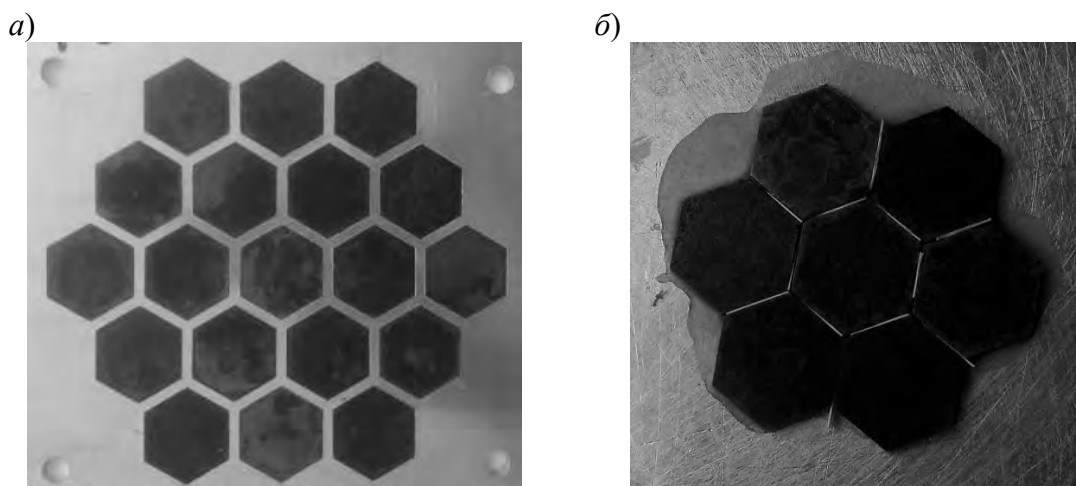


Рис. 2. Отдельный слой гибридного материала, полученного размещением элементов в ячейки металлической плиты (а) и с использованием клеевой композиции (б)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования* / В. А. Григорян [и др.]; под ред. В. А. Григоряна. – Москва: РадиоСофт, 2008. – 406 с.
2. *Легкие защитные структуры* / И. А. Беспалов [и др.]. – Москва: РадиоСофт, 2017. – 368 с.
3. **Романовский, В. С.** Сравнительный анализ существующих материалов из защитных структур и технико-экономическая оценка конструкции бронезащиты / В. С. Романовский, К. В. Мелихов, Н. Д. Изергин // *Изв. ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – Вып. 6. – С. 87–97.
4. **Понькин, А. В.** Оценка возможности использования в конструкции бронежилета металлических бронеэлементов мозаичной конструкции / А. В. Понькин, П. В. Кочнев // *Вестн. ЮУрГУ*. – 2010. – № 9. – С. 16–20.
5. **Fejdys, M.** *Hybride Composite Armour Systems with Advanced Ceramics and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Fibres* / M. Fejdys // *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*. – 2016. – № 24.3 (117). – P. 79–89.

УДК 621.785.5

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ  
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95А. А. ПРЕДКО, И. Г. ОЛЕШУК, А. Н. МОИСЕЕНКО,  
И. Л. ПОБОЛЬ, Н. А. КАНАНОВИЧФизико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Алюминиевый деформируемый сплав В95 – это один из самых востребованных, универсальных материалов системы «алюминий – цинк – магний – медь». Благодаря высокому качеству, прочности и эксплуатационным характеристикам материал используют для создания высоконагруженных конструкций, ракетной техники и самолётов. Улучшение эксплуатационных свойств сплава В95 позволит расширить сферу его применения и продлить срок службы изделий.

Перспективным методом повышения твёрдости материала поверхностного слоя, износостойкости и коррозионных свойств алюминиевых сплавов является ионно-плазменное азотирование (ИПА). В [1] получены данные о глубине проникновения ионов азота в сплав AlMg4.5Mn (аналог сплава АМг4,5) методом ИПА. Диффузионный слой толщиной 15 мкм был получен за 6 ч обработки при температуре 500 °С. Выявлено негативное влияние кислорода на толщину слоя. Присутствие даже в незначительных количествах кислорода может препятствовать образованию диффузионного слоя в целом.

В [2] после обработки в плазме тлеющего разряда твердость поверхностного слоя алюминия А7 возросла до HV 1173, что в 4,3 раза превышает твердость основы. В [3] приводятся данные о структуре и толщине диффузионного слоя при обработке сплава А999 методом ИПА. Глубина азотированного слоя составляла от 125 до 300 нм.

Целью работы являлся выбор технологических параметров процесса ИПА образцов из сплава В95, изучение структуры, твердости, фазового состава и коррозионных свойств упрочненных слоев.

Для проведения исследований использовали образцы из сплава В95 диаметром 25 мм и толщиной 6 мм. Состав сплава В95 по ГОСТ 4784–97 масс. %: 1,8...2,8 Mg; 0,2...0,6 Mn; 0,1...0,25 Cr; 1,4...2,0 Cu; до 0,5 Fe; до 0,5 Si; до 0,05 Ti. Шероховатость поверхности образцов доводилась до значений в пределах  $R_a = 0,08...0,1$  мкм.

ИПА проводили на оборудовании, изготовленном в ФТИ НАН Беларуси с учетом возможности максимально возможного предварительного удаления оксидированного слоя с поверхности обрабатываемых образцов очисткой ионами азота или водорода и аргона. Все параметры процесса контролировали в процессе обработки (рис. 1). Температура процесса азотирования составляла 450 °С и 500 °С, время выдержки – 12 ч в газовой среде азота, водорода и аргона.

Исследование слоев на образцах после ИПА методом оптической электронной спектроскопии с помощью прибора GDOES Profiler 2 подтвердило наличие

азотированного слоя глубиной до 1,2 мкм. По данным микрорентгеноспектрального анализа, содержание азота на поверхности достигало 4,28 масс. %.

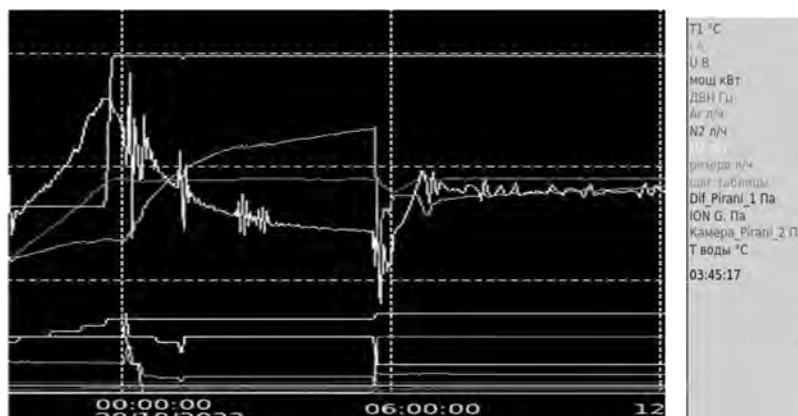


Рис. 1. Графическое изображение параметров процесса ИПА

Микротвердость образца до ионно-плазменной обработки составляла  $HV_{0,1} 81$ . После ИПА микротвердость поверхностного слоя возросла до  $HV_{0,1} 113$ , а сердцевины снизилась до  $HV_{0,1} 70$ , что может быть связано с разупрочнением в процессе выдержки при температуре азотирования.

Изучение морфологии поверхности образца из сплава В95 на растровом электронном микроскопе показало, что после ИПА упрочненный слой имеет ячеистую структуру.

Рентгенофазовый анализ образцов из сплава В95 на дифрактометре ДРОН 3.0 после ИПА выявил наличие Al и нитрида алюминия AlN (от плоскостей 111, 200 и 002). Кроме того, на дифракционной картине регистрируются линии низкой интенсивности  $MgZn_2$ , что может быть связано с малой толщиной упрочненного слоя.

Испытания на коррозионную стойкость проводили на потенциостате-гальваностате AUTOLAB электрохимическим методом поляризационных кривых в стандартной трехэлектродной ячейке в 3-процентном растворе NaCl при комнатной температуре и без конвекции. Скорость коррозии образца из сплава В95 до ионно-плазменной обработки составила 3,383 мм/год. После ИПА скорость коррозии составила 1,446 мм/год, что свидетельствует о повышении коррозионных свойств в 2 раза по сравнению с исходным материалом.

*Авторы выражают благодарность БРФФИ за финансовую поддержку, грант № T22M-090.*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nitriding of stainless steel and aluminum alloys by plasma immersion ion implantation / E. Richter [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 128. – P. 21–27.
2. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / О. В. Крысина [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: сб. ст. – Минск, 2017. – С. 250–252.
3. **Sonnleitner, R.** Microstructure of plasma nitrided layers on aluminium / R. Sonnleitner, K. Spiradek-Hahn, F. Rossi // Surface and Coatings Technology. – 2002. – № 156. – P. 149–154.

УДК 621.732

НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ  
НА ПОСАДОЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ СОПРЯГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙА. М. СТАРОВОЙТОВ<sup>1</sup>, А. Л. ГОЛОЗУБОВ<sup>2</sup>, В. В. БЕРЕЗОВСКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Мозырский государственный педагогический университет

имени И. П. Шамякина

Мозырь, Беларусь

Соединения на переходных посадках находят широкое применение в машиностроении и используются для редко разбираемых сопряжений.

Для повышения эксплуатационных характеристик (увеличения количества циклов сборки-разборки) предлагается использовать метод нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий из дуговой плазмы при атмосферном давлении, имеющих высокую твердость и адгезию, сплошность, стойкость к действию агрессивных сред (с возможностью точного контроля толщины по интерференционной картине).

На основании исследований фазового и химического элементного состава, проведенных методами рентгеноспектрального микроанализа и фазового рентгеноструктурного анализа, было определено, что получаемые из дуговой плазмы при атмосферном давлении тонкопленочные покрытия имеют аморфную (стеклообразную) структуру, характеризующуюся высокой степенью структурных несовершенств. Для тонкопленочного покрытия, содержащего оксид кремния с небольшим (до 5 %) присутствием карбидов,  $H_{\mu}^k = 7,58...9,2$  ГПа; на основе карбида кремния с содержанием оксидов в пределах 3 %...5 %  $H_{\mu}^k = 20,0...24,8$  ГПа; из нитрида кремния  $H_{\mu}^k = 12,5...15,7$  ГПа. Повышение поверхностной твердости способствует повышению стойкости к истиранию сопрягаемых поверхностей. Производительность процесса составляет 5...10 см<sup>2</sup>/мин. Длительность обработки зависит от назначаемой толщины покрытия и для упрочнения участка поверхности вала диаметром 50 мм и длиной 30 мм не превышает 3...5 мин.

Применение технологии упрочнения посадочных мест (контактирующих поверхностей) рационально использовать для деталей, имеющих высокую стоимость изготовления, большие габаритные размеры и массу. Технологический процесс использовался в условиях реального производства на ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод», где показал свою эффективность при упрочнении посадочных мест для подшипников качения валов центробежных насосов типа НК (материал – сталь 40Х, 290 НВ), предназначенных для перекачки нефти, сжиженных углеводородных газов и нефтепродуктов.

УДК 621.793.18

## ПЛАНАРНЫЕ МАГНЕТРОНЫ СО СВЕРХВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА МИШЕНИ

О. И. ТЕРЕЩУК<sup>1</sup>, В. М. КОМАРОВСКАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центр образования и исследований ООО «Изовак»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Магнетронное распыление широко используется в промышленности для осаждения тонких пленок на подложки. Это обусловлено высокими скоростями, возможностью прогнозирования физико-механических свойств покрытий и, что немаловажно, такая технология позволяет формировать покрытия на детали с большой площадью. Для реализации данной технологии используются магнетронные распылительные системы (МРС) различной конфигурации.

Однако для общепринятой конструкции планарного магнетрона коэффициент использования материала мишени (КИМ) в подавляющем большинстве не превышает 20 %...30 % [1]. При таких порядках КИМ профиль эрозии мишени во время ее распыления имеет форму глубокой узкой канавки, что влечет за собой частую смену мишени-катода. Эта необходимость возникает из-за опасности вскрытия каналов охлаждения, непосредственно соприкасающихся с нижним торцом мишени, и натекания охлаждающей жидкости в камеру.

Для решения этой проблемы (низкий КИМ) используется несколько подходов.

1. Использование специального растягивающего магнитного шунта между наружным и внутренним полюсами магнитной системы магнетрона.

2. Применение дополнительных магнитных полюсов, изменяющих конфигурацию силовых линий магнитного поля таким образом, чтобы растянуть зону ионизации над мишенью на как можно большую площадь, что в свою очередь обеспечит увеличение выработки мишени (рис. 1).

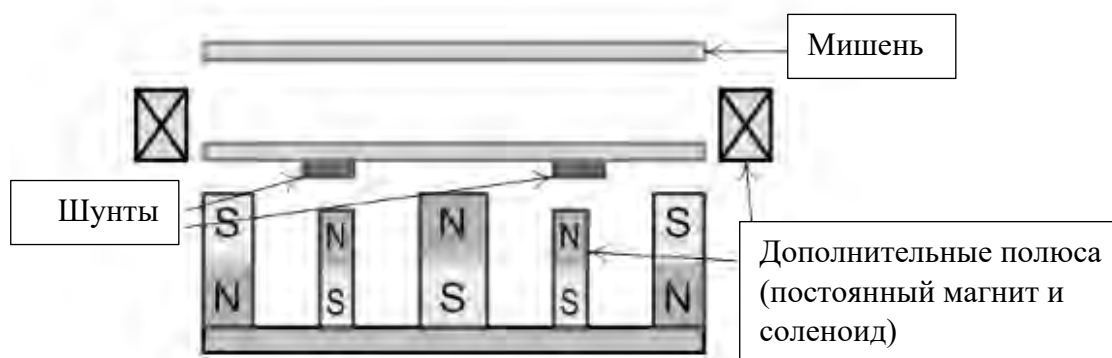


Рис. 1. МРС с дополнительными шунтами

3. Использование специальной сложной схемы укладки магнитов, что позволяет получать над поверхностью мишени зону ионизации, имеющую разветвленную и усложненную форму в сравнении с обычным круглым (для



круглых мишеней) или эллипсовидным (для прямоугольных мишеней) треком эрозии.

4. Использование подвижной магнитной системы для создания имеющих в зарубежной литературе название full face erosion FFE-магнетронов распыления (рис. 2).

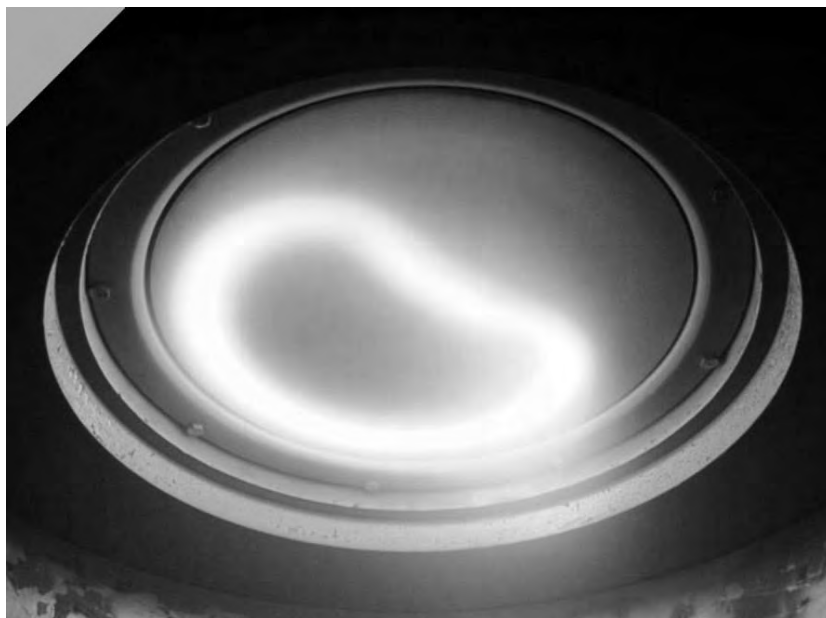


Рис. 2. МРС с подвижной магнитной системой

Применение при разработке магнетронных распылительных систем первых трех пунктов из вышеперечисленных позволяет увеличить КИМ только до 40 %...45 % (максимум) [2].

FFE-магнетроны позволяют достигать КИМ вплоть до 80 % при некоторых конфигурациях [3]. Такие высокие коэффициенты использования материала мишени в магнетронах имеют широкие перспективы для технологий, подразумевающих под собой использование драгоценных материалов для получения покрытий. Ввиду этого исследование различных типов подвижных магнитных систем, изучение процессов ионизации и поддержания магнетронного разряда, а также зависимость профиля эрозии от применяемой магнитной системы и скорости ее вращения имеют особую важность в направлении совершенствования магнетронных распылительных систем.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузьмичев, А. И.** Магнетронные распылительные системы. Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления / А. И. Кузьмичев. – Казань: Аверс, 2008. – 244 с.: ил.
2. **Bishop, C. A.** Vacuum Deposition onto Webs, Films, and Foils / C. A. Bishop. – The Boulevard, Langford Lane, Oxford, 2011. – 545 с.
3. **Iseki, T.** Flat erosion magnetron sputtering with a moving unbalanced magnet / T. Iseki // Vacuum. – 2006. – Iss. 80, № 7. – С. 662–666.

УДК 621.9

СПОСОБ ПОДГОТОВКИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ  
ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯА. С. ФЕДОСЕНКО<sup>1</sup>, И. К. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>,  
В. А. БЕЛЯКОВИЧ<sup>1</sup>, Ю. В. СЕЛИВАНОВА<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусско-Российский университет<sup>2</sup>Могилевский государственный политехнический колледж  
Могилев, Беларусь

Керамические покрытия, формируемые плазменным напылением, отличаются высокой твердостью, износостойкостью, жаростойкостью. Как правило, их получают из материалов на основе оксидов алюминия, титана, хрома, циркония, при этом используют порошки, состоящие из частиц оскольчатой формы, размер которых не превышает 30 мкм. Материалы, состоящие из таких частиц, отличаются плохими технологическими характеристиками. Они склонны к зависанию в бункере дозирующего устройства и каналах воздушно-порошкового тракта, комкованию, налипанию. Это нарушает стабильность процесса и снижает его производительность.

В ходе проведения исследований был разработан специальный способ подготовки керамических порошков, позволяющий улучшить их технологические характеристики. В его основе лежит использование операции конгломерирования мелкодисперсного материала с помощью связующего.

Эксперименты проводились на порошках, состоящих из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , с добавкой оксида титана  $TiO_2$ , количество которого не превышало 13 %. Размер частиц исходных порошков составлял менее 10 мкм. Компоненты смешивали со связующим до получения однородного вещества. Приготовленный раствор подвергали сушке при температуре не более 70 °С, после чего прокаливали для удаления остатков влаги и компонентов связующего. Изготовленный брикет дробили и измельчали до порошкообразного состояния, затем отсеивали требуемую фракцию.

Перед подачей в высокотемпературный поток материал подогревали до температуры не более 200 °С.

Исследования показали, что порошок, подготовленный описанным способом, характеризуется стабильным равномерным дозированием. Помимо этого, улучшение его текучести обеспечивает возможность подачи в плазму большего количества порошка в единицу времени без снижения стабильности подачи. Это, в свою очередь, позволяет повысить коэффициент использования материала, а также плотность покрытий и их износостойкость. Последнее, вероятнее всего, обусловлено тем, что частицы порошка проникают глубже в высокотемпературную область, разогреваясь до больших температур. Это уменьшает вязкость материала, улучшая его растекание по подложке, что способствует уменьшению количества пор, влияющих на износостойкость.

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО  
ЛЕГИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛУМИНОВЫХ ПОРОШКОВ

А. С. ФЕДОСЕНКО, А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Алюминий-кремниевые сплавы широко используются в области аддитивных технологий. Основной недостаток изделий из них – невысокая прочность, обусловленная формированием крупнозернистой структуры и химической неоднородностью материала. Для снижения вероятности образования указанных дефектов микроструктуры перспективно использование порошков, полученных технологией реакционного механического легирования.

В ходе экспериментальных исследований были изучены гранулометрический состав, микроструктура и морфология частиц синтезируемых материалов системы Al–Si–Mg. Выбрана композиция Al–10 % Si–0,45 % Mg.

Установлено, что частицы порошка в процессе формирования проходят основные стадии, характерные для технологии механического легирования, однако первый этап, сопровождающийся измельчением исходных компонентов, менее выражен, а процессы, связанные с грануляцией, получают более активное развитие. В то же время выявлено, что обрабатываемая шихта менее склонна к грануляции по сравнению с другими группами алюминиевых сплавов, как правило, требующими введения существенного количества веществ, замедляющих данный процесс.

С увеличением длительности обработки с 1 до 6 ч форма частиц меняется с несимметричной и оскольчатой на округлую. Возрастает их химическая однородность. Также наблюдается существенный рост микротвердости гранул, значение которой повышается более чем в 2 раза в интервале обработки 1...8 ч. Гранулометрический состав при этом смещается в сторону снижения среднего размера частиц.

Термическая обработка существенно влияет на структуру и свойства механически легированных порошков, поскольку активизирует взаимодействие между веществами, входящими в состав шихты. Для изучения влияния отжига на характеристики частиц синтезированных материалов исследуемой системы выполняли нагрев до температуры  $0,8T_{пл}$  основы синтезируемой композиции.

Установлено, что наибольшей твердостью частицы получаемых порошков обладают непосредственно после процесса механического легирования. С увеличением температуры нагрева их микротвердость снижается и достигает минимального значения после выдержки при 450 °С.

Микроструктура частиц в результате отжига не претерпевает заметных изменений. Они сохраняют плотное и однородное строение.

УДК 621.9

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ НА СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

А. С. ФЕДОСЕНКО, А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ, И. К. АНДРЕЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Структура и свойства газотермических плазменных покрытий существенно зависят не только от режимов работы применяемого оборудования, но и от характеристик порошка. На формируемый слой значительное влияние оказывают форма, размер, фазовый состав и строение частиц, а также температура плавления материала, химическая активность основы и легирующих элементов. Это справедливо и для порошков, полученных способом реакционного механического легирования.

В ходе исследований было изучено влияние условий получения порошков, их химического состава и термической обработки на характеристики плазменных покрытий.

Установлено, что исследуемые материалы на основе железа и никеля, не содержащие в качестве поставщика кислорода оксидов с низкой термодинамической стабильностью и имеющие размер частиц 63...125 мкм, обеспечивают формирование покрытий, характеризующихся высокой плотностью, классическим слоистым строением и равномерным распределением элементов. При этом применение порошков, прошедших более длительную обработку в механореакторе, способствует повышению микротвердости покрытий без изменения их микроструктуры.

Введение в состав исходной композиции оксидов, являющихся поставщиками кислорода, сопровождается повышением пористости покрытий. Число и размер пор растет с увеличением содержания данных соединений. Такое поведение обусловлено химической реакцией между вводимым оксидом и восстановителем (алюминий), не получающей полного завершения на стадии механического легирования. Взаимодействие протекает с выделением значительного количества тепла, что перегревает напыляемые частицы и способствует более активному взаимодействию их с окружающей средой. Это приводит к образованию большего количества тугоплавких соединений. Обладая низкой пластичностью, они не деформируются в момент соударения капли расплава с подложкой, вызывая образование в слое структурной неоднородности и небольших пор.

Термическая обработка порошков оказывает существенное влияние не только на свойства покрытий, но и на их микроструктуру. Для достижения максимальной твердости получаемых слоев отжиг порошков является обязательной операцией, поскольку способствует увеличению микротвердости до 23 %. Помимо этого, превращение материалов из терморезирующих в термонеутральные позволяет уменьшить количество пор на 5 %...12 %.

УДК 542.8:544.14+537.31+691.175

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

Л. Н. ФИЛИППОВИЧ<sup>2</sup>, С. Н. ЛЕМЕШОНОК<sup>1</sup>,  
П. В. НЕСТЕРЕНКО<sup>2</sup>, Ж. В. ИГНАТОВИЧ<sup>1</sup>, А. А. РОГАЧЕВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси<sup>2</sup>Институт физико-органической химии НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Одним из быстроразвивающихся направлений является создание упаковки с использованием биоразлагаемых полимеров, которые способны к деструкции микроорганизмами в условиях окружающей среды.

Поверхностная обработка бумаги тонким слоем (до 100 мкм) на основе биополимера улучшает механические свойства, прочность и эластичность бумажного изделия во влажной среде. Актуальной задачей является создание композиций из нескольких биоразлагаемых материалов, в которых матричная фаза – это биоразлагаемый полимер, например полилактид, хитозан, а наполнитель – дешевое сырье – крахмал, древесная мука, лузга злаковых культур и т. д. [1, 2].

Цель работы – разработать составы для формирования композиционных материалов на основе ПЛА и отечественных наполнителей (азолигнина, наноцеллюлозы окисленной, динатриевой соли 4,4'-азобензолдикарбоновой кислоты) и исследовать их оптические и физико-химические свойства.

Материалы и методы. Составы для формирования пленок готовили из 1,0 %...5,0 % полилактида (ПЛ Mw = 215 000) – шифр ПЛ-12, содержащие (масс. %): азолигнин (1,0...1,2) – шифр ПЛ-8; азолигнин (1,0...1,2), наноцеллюлозу окисл. (11,0), AlCl<sub>3</sub> (4,0) – шифр ПЛ-9; азолигнин (1,0...1,2), наноцеллюлозу окисл. (11,0), AlCl<sub>3</sub> (4,0), УФ-стабилизатор – динатриевую соль 4,4'-азобензолдикарбоновой кислоты, ДНС (0,6) – шифр ПЛ-10; остальное – хлороформ до 100 %. Пленки сушили при комнатной температуре. Толщина пленок составила 40...60 мкм. Температуру процесса варьировали от 25 °С до 90 °С. Азолигнины получали азосочетанием активированного щелочью гидролизного лигнина с продуктами диазотирования сульфаниловой кислоты и бензида. Окисленная целлюлоза, а именно диальдегид целлюлоза, получена из бактериальной наноцеллюлозы (БНЦ), продуцируемой уксуснокислыми бактериями *Komagataeibacter* (симбиоз дрожжей и уксуснокислых бактерий), с использованием методики периодатного окисления.

В УФ-спектрах образцов пленок имеются максимумы при 239 нм (D = 2,025) – ПЛ-12, при 272 нм (D = 2,973) – ПЛ-8, при 350 нм (D = 4,000) – ПЛ-9, при 306 нм (D = 3,720) – ПЛ-10, т. е. при введении дополнительно добавок азолигнина, наноцеллюлозы и ДНС светопропускание образцов уменьшается. В области 400...500 нм образцы ПЛ-8-ПЛ-10 характеризуются невысоким светопропусканием, не превышающим 8 %. Кроме того, образцы оказались довольно устойчивыми к облучению УФ-светом ртутной лампы.

Установлено, что изученные образцы воду не сорбируют: наибольший угол краевого смачивания у образцов ПЛ-9 и ПЛ-10, содержащих наноцеллюлозу

окисленную ( $77,97^\circ \dots 79,50^\circ$  и  $46,65^\circ \dots 47,82^\circ$ ). Для образца ПЛ-8, содержащего азолигнин, угол составил  $12,59^\circ \dots 13,42^\circ$  (рис. 1).

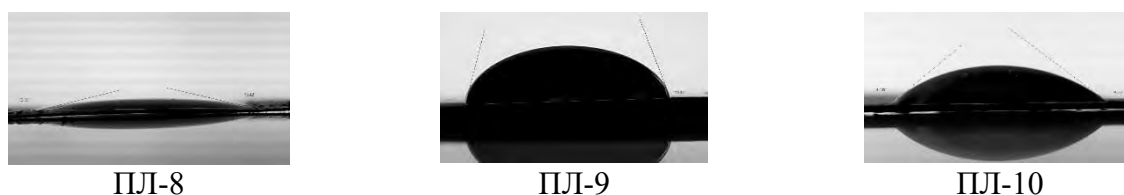


Рис. 1. Изображения капель воды

Из кривых зависимости нагрузка-удлинение рассчитаны прочностные характеристики образцов (табл. 1). Наибольшей прочностью характеризуются образцы ПЛ-12 ( $1124,0 \text{ Н/мм}^2$ ) > ПЛ-8 ( $1023,0 \text{ Н/мм}^2$ ) > ПЛ-10 ( $851,8 \text{ Н/мм}^2$ ), т. е. добавка азолигнина практически не уменьшила прочности образца.

Табл. 1. Прочность образцов

Образец, пленка №	ПЛ-8	ПЛ-9	ПЛ-10	ПЛ-12
Ширина образца, мм	2	2	1	5
Толщина, мкм	100	160	110	100
Нагрузка при разрыве, Н	204,6	163,3	93,7	112,4
Прочность, $\text{Н/мм}^2$	1023,0	510,3	851,8	1124,0

Таким образом, можно сделать вывод, что введение в ПЛА азолигнинового красителя не ухудшает прочности образцов, добавки наноцеллюлозы окисленной, УФ-стабилизатора (ДНС) и азолигнина, защищает материал от воздействия влаги и УФ-излучения, что имеет большой потенциал при разработке упаковочных материалов.

*Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы» задания 8.4.2.2 и Договора БРФФИ № T23УЗБ-059 «Разработка фундаментальных основ создания модифицированной углеродной ткани и производных целлюлозы с целью получения медицинских материалов с комплексными свойствами».*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подденежный, Н. Е. Биоразлагаемые композиты на основе полилактида и органических наполнителей / Н. Е. Подденежный, А. А. Дробышевская, Е. Н. Бойко // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2021. – № 3. – С. 20–25.
2. Bioactive film based on chitosan incorporated with cellulose and aluminum chloride for food packaging application: Fabrication and characterization / Eya Beji [et al.] // Food Bioscience. – 2023. – Vol. 53. – P. 102678.

УДК 621.762

## ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СТАЛИ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

А. И. ХАБИБУЛЛИН

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

При литье стальных изделий имеется возможность модифицирования стали в процессе плавки с целью измельчения структуры. Используя метод реакционного механического легирования, можно получать модифицирующую шихту по универсальной технологии, разработанной в Белорусско-Российском университете, для литья любых типов сплавов.

После завершения механического легирования порция шихты массой 0,3 кг подвергалась холодному брикетированию на гидравлическом прессе с усилием 100 т. Получали брикеты диаметром 26 и 40 мм с плотностью 6,5 и 4,8 г/см<sup>3</sup> соответственно. При введении полученной модифицирующей шихты в расплав стали существует проблема флотации порошковой смеси. Для отработки процесса ввода в индукционную печь шихты с наноразмерными модификаторами на ОАО «Могилевлифтмаш» проводилась серия испытаний механических свойств стали 45Л.

Перед плавкой на дно индукционной печи помещали брикет модифицирующей лигатуры, который заваливали шихтовым материалом стали 45Л. После расплавления 250 кг стали проводилось раскисление ее алюминием в количестве 0,50 кг и разливка по изложницам. В результате исследований установлено, что брикеты с плотностью 4,8 г/см<sup>3</sup> всплывали на поверхность, растворяясь в расплаве на 15 %...20 %, а брикеты с плотностью 6,5 г/см<sup>3</sup> растворялись полностью.

Чтобы устранить дополнительную операцию прессования, связанную с применением дорогостоящей технологической оснастки и гидравлического пресса, исследовали возможность введения модифицирующей шихты в виде порошкообразной массы. Для этого порошковую композицию вводили в печь на разных этапах плавки.

Установлено, что в процессе плавки шихтового материала стали 45Л при засыпке модифицирующей шихты в печь в интервале 0,4...0,6 от времени завершения плавки механические свойства стали 45Л соответствуют свойствам, получаемым при использовании брикетов с плотностью 6,5 г/см<sup>3</sup>. Следовательно, имеется возможность использовать модифицирующую порошковую шихту без дополнительной операции брикетирования.

УДК 538.911

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СПЛАВА 5БДСР  
ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

И. М. ХОЗРОМ, А. Д. ОШОРОВ, И. В. УШАКОВ

Университет науки и технологий МИСИС

Москва, Россия

Нанокристаллические металлические сплавы представляют собой уникальные материалы, обладающие улучшенными механическими характеристиками и множеством потенциальных преимуществ относительно традиционных материалов [1, 2]. Существенным недостатком таких материалов является малая толщина, что ограничивает их применение в качестве элемента конструкции [3, 4]. Одним из способов устранения данного недостатка является создание композита на основе таких сплавов.

Создание композитных материалов представляет собой перспективное направление в физике конденсированного состояния и материаловедении, позволяющее формировать материалы с определенными характеристиками [5, 6]. В исследовании разработан композитный материал на основе нанокристаллического сплава марки 5БДСР с легкоплавким сплавом SD-318. Нанокристаллический сплав марки 5БДСР произведен на Ашинском металлургическом заводе в виде ленты толщиной 30 мкм и шириной 25 мм; химический состав: 77 % Fe + 1 % Cu + 3 % Nb + 13 % Si + 3 % В (вес. %). Легкоплавкий сплав SD-318 был в виде паяльной пасты; химический состав: 63 % Sn + 37 % Pb (вес. %).

Были проведены экспериментальные исследования с использованием различных легкоплавких сплавов с целью выбора оптимального сплава для создания композита с нанокристаллической лентой. В результате анализа полученных данных выявлено превосходство SD-318 над другими легкоплавкими сплавами из-за низкой температуры плавления (183°) и вязкости (200 Па), обеспечивающей равномерное распределение сплава по поверхности нанокристаллической ленты. Процесс подготовки образцов включал в себя очистку лент, нанесение флюса и покрытие паяльной пастой. Подготовленные образцы помещали в электрическую печь при 200 °С на 5 мин. Готовые образцы подвергали одноосному растяжению на разрывной машине INSTRON 3365. Скорость деформации составляла 0,1 мм/с; ширина испытываемых образцов – 25 мм; длина рабочей зоны – 60 мм. Испытания проводились в трех температурных режимах для образцов сплава марки 5БДСР и для полученных композитов.

Результаты испытания аморфных нанокристаллических образцов марки 5БДСР показали, что напряжение при комнатной температуре составляет 1300 МПа. При температуре 220 К напряжение уменьшается на 4,1 %, а при температуре 78 К – на 16,2 %. При этом максимальное относительное удлинение образца 2,87 % наблюдается при температуре 220 К, а минимальное – при комнатной температуре – 1,81 %. Относительное удлинение при температуре 78 К составляет 2,08 %.



После проведения испытаний на растяжение нанокристаллического образца наблюдалось разрушение образца на множество мелких частиц при низких температурах. Разрыв образца произошел без формирования выраженной шейки, характерной для более пластичных материалов. Полученные частицы представляли собой острые и нерегулярные обломки, свидетельствуя о характере хрупкого разрыва. Фрагментация материала произошла в результате интенсивного распространения трещин в зонах локализации напряжений. Микроанализ структуры показал, что частицы образовались вдоль границ зерен, что подчеркивает влияние металлической нанокристаллической структуры на процесс разрушения. Полученные фрагменты обладали нанокристаллической текстурой с неровной поверхностью и микроскопическими трещинами вдоль границ зерен, подтверждая характер механического разрушения.

Результаты испытаний показали, что напряжение композита при комнатной температуре составляет 630 МПа, при температуре 220 К напряжение уменьшается на 12,8 %, а при температуре 78 К – на 29 %. Максимальное относительное удлинение композита 2,3 % наблюдается при комнатной температуре 298 К, а минимальное 1,6 % – при 78 К. Относительное удлинение композита при 220 К составляет 1,9 %.

При криогенных температурах композит разрушался на два больших куса с образованием небольших сколов на границе разрушения. Это может означать, что происходит вязкое разрушение, т. е. не наблюдается полное охрупчивание композита при воздействии таких температур.

Полученные результаты могут быть применены для формирования композитных материалов с желаемыми характеристиками и расширения теоретического понимания физики разрушения таких материалов. Разработанные композиты на основе нанокристаллической ленты и легкоплавкого сплава могут быть использованы в условиях низких температур.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Температура хрупко-вязкого перехода трубной стали К65 – экспериментальное определение и сопутствующие признаки / А. Б. Арабей [и др.] // Вести газовой науки: науч. техн. сб. – 2020. – № 2 (44). – С. 152–161.
2. **Ушаков, И. В.** Микроразрушение многослойного композита на основе аморфно-нанокристаллического металлического сплава / И. В. Ушаков, А. Д. Ошоров // Вестн. Моск. авиационного ин-та. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 246–252.
3. **Мильман, Ю. В.** О механизмах деформации в аморфных металлических сплавах / Ю. В. Мильман, Д. В. Козырев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 50–55.
4. **ГОСТ 1497–84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Изд-во стандартов, 1986. – 22 с.
5. **Шинкин, В. Н.** Предварительная правка стальной полосы / В. Н. Шинкин // Черные металлы. – 2018. – № 5. – С. 34–40.
6. **Safronov, I. S.** Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation / I. S. Safronov, A. I. Ushakov // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 469–474.

УДК 621.793:66.088

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И УГЛЕРОДНЫХ МАТРИЦН. М. ЧЕКАН<sup>2</sup>, Е. В. ОВЧИННИКОВ<sup>1</sup>, Г. А. КОСТЮКОВИЧ<sup>1</sup>,  
И. П. АКУЛА<sup>2</sup>, Е. И. ЭЙСЫМОНТ<sup>1</sup><sup>1</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы  
Гродно, Беларусь<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

В настоящее время существует достаточно большое количество работ, посвященных процессам роста покрытий на основе нитридов переходных металлов, в частности TiN, формируемых при различных режимах осаждения. Изучены покрытия нитрида титана, сформированного на стальных образцах. Исследования поверхности подложек, проведенные методом атомной силовой микроскопии, свидетельствуют о значительных изменениях топографии и морфологии нитрида титана после нанесения олигомерных пленок. Формирование базового покрытия из нитрида титана осуществляли методом реактивного электродугового испарения на установке УРМЗ.279.048. В качестве подложки использовали стальные пластины или стержни (диаметром 10 мм) из стали 45, закаленные до 58...60 HRC, с чистотой поверхности  $R_a = 0,25$  мкм. Группа исследователей под руководством Джо Грина и Ивана Петрова исследовала рост и формирование микроструктуры покрытий TiN, TiAlN и родственных им соединений, получаемых по различным технологическим режимам. При осаждении покрытий варьировались энергии падающих ионов на поверхность металлического субстрата, изменялось напряжение смещения. Данный подход позволил обеспечить понимание роли энергии ионов и поверхностной диффузии в процессах формирования микроструктур таких покрытий. Покрытия AlSiN с использованием источника AlSi с двойным катодом, содержащим 12 ат. % Si, формируемые при 450 °С, были изучены авторским коллективом под руководством А. П. Ласковнева. Было показано, что твердость покрытий составляла порядка 35 ГПа, однако покрытия имели плохую адгезию к поверхности субстрата. Покрытия AlTiN обладают высокой твердостью, достаточной стойкостью к окислению при воздействии высоких температур, сопротивлением к усталостному разрушению, широко используются для модифицирования вставок из сверхтвердых материалов для увеличения эксплуатационного ресурса при обработке резанием. Однако при увеличении скорости подачи резца и вращения самого обрабатываемого изделия традиционное покрытие AlTiN не достигает ожидаемого увеличения эксплуатационного ресурса. Одним из эффективных методов повышения износостойкости покрытий на основе AlTiN является введение Si в состав данного химического соединения. Согласно проведенным исследованиям, на границе зерен AlTiN выделяется аморфный  $Si_xN_y$ , который может ограничивать рост зерен покрытия. Одновременно формируются нанокпозиционные структуры, что приводит к

улучшению механических свойств и повышению стойкости к высокотемпературному окислению. С другой стороны, Si, содержащийся в покрытиях AlTiSiN, задерживает процесс разложения Ti–Al–N при отжиге и, таким образом, позволяет сохранить высокие значения твердости при повышенной температуре. В результате покрытия AlTiSiN обладают лучшей термической стабильностью, чем AlTiN. Однако данный эффект сопровождается уплотнением структуры покрытия и неизбежно приводит к увеличению остаточных сжимающих напряжений в покрытиях, что уменьшает ударопрочность покрытий и ограничивает их применение в тяжелых условиях эксплуатации обрабатываемого инструмента. Ряд исследований подтверждает, что твердость стала одним из ключевых факторов, влияющих на производительность обработки резанием. Повышенная износостойкость, низкие внутренние остаточные напряжения, высокая твердость и адгезионное взаимодействие являются наиболее перспективными направлениями в развитии инженерии поверхности, связанной с созданием покрытий для металлообработки. В последние годы предложены методы для снижения остаточных внутренних напряжений и улучшения пластичности твердых и сверхтвердых покрытий. Покрытия на основе алтинов представляют интерес в качестве антифрикционных, т. к. в их структуре установлены нанокпозиционные фазы, оказывающие влияющий характер на свойства данных соединений. В ряде случаев они могут заменить смазочные материалы и покрытия на основе дисульфида молибдена, графита, алмазоподобных покрытий. Предложены составы покрытий TiAlN + C. Данный подход должен был обеспечить контролируемое изменение твердости при трении, причем этот эффект связан со структурными изменениями в защитных слоях на основе алтинов. Определено влияние углерода на микроструктуру тонких пленок серии влияния углерода (Ti, Al)(N, C) с различным содержанием углерода (0...28 ат. %), которые формировались реактивным магнетронным распылением мишени TiAl в смеси Ar, N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Элементный состав (Ti, Al)(N, C) покрытия определяли методом микрорентгеноспектрального анализа с точностью 1 %...2 % по углероду как основному элементу покрытий. Согласно данным оптической и растровой электронной микроскопии, в структуре покрытий образуется достаточно большое количество глобулярных образований, размеры и концентрация которых зависит от технологии формирования и химического состава покрытий. В результате осаждения материала покрытий в вакууме с использованием ионно-плазменного потока в структуре покрытий формируются нанофазные объекты, которые должны приводить к существенным изменениям прочностных и адгезионных характеристик осаждаемых слоев. В покрытиях AlTiSi (C,N) наблюдается большое количество включений, находящихся по размерам в микронной области. Данные образования являются агломератами более низкоразмерных частиц. Возможно, данные частицы являются фазами трехкомпонентных и более соединений, наподобие MAX-фаз.

УДК 621.791.72

## МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЯ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

В. К. ШЕЛЕГ, Н. И. ЛУЦКО, М. А. КАРДАПОЛОВА  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Лазерная наплавка с поперечным относительно направления наплавки сканированием лазерного пятна начала широко применяться не более 15 лет назад. Развитие этого направления связано, прежде всего, с появлением нового поколения твердотельных лазеров большой мощности. Большая мощность и высокий коэффициент поглощения излучения этих лазеров металлами заставили искать пути распределения излучения на достаточно большой площади пятна, чего не удавалось достигнуть простой расфокусировкой луча [1]. Решить проблему как раз и позволило применение систем программно управляемого сканирования лазерного луча. Кроме решения проблемы расфокусировки луча, это позволило увеличить производительность и стабильность процесса лазерной наплавки [2].

Поскольку процесс лазерной наплавки с поперечным сканированием достаточно сильно отличается от традиционной лазерной наплавки, для исследователей представляет интерес изучение свойств покрытий из широко используемых наплавочных материалов. Произведена попытка исследовать микротвердость в поперечном сечении наплавленного лазером покрытия из сплава системы Ni–Cr–B–Si – ПГ-12Н-01, имеющего следующий химический состав (вес. %): Ni – основа; Cr – 8 %...14 %; B – 1,7 %...2,0 %; Si – 1,2 %...3,2 %; Fe – 1,2 %...3,2 %; C – 0,3 %...0,6 %.

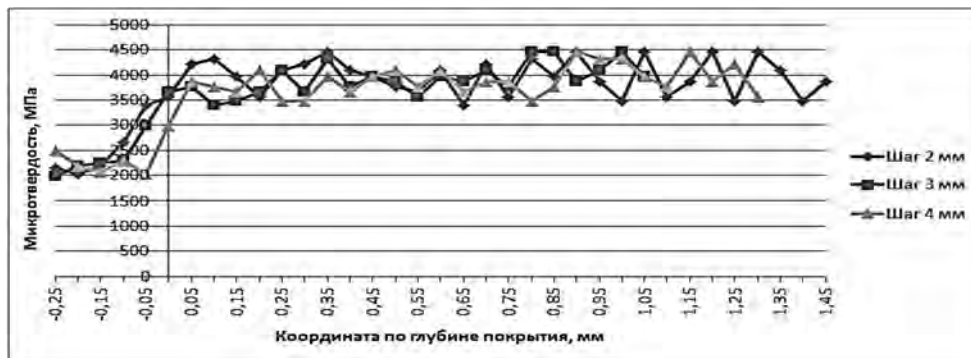
Наплавка выполнялась с боковой подачей порошка, лазерным источником являлся волоконный иттербиевый лазер YLR-1 с максимальной мощностью излучения 1000 Вт. Поперечное сканирование луча выполнялось программируемым 2D-сканером фирмы «Ситела». Необходимые перемещения лазерного пятна относительно плоских образцов из стали 45 обеспечивались координатным столом с числовым программным управлением, подача порошка осуществлялась с помощью дискового питателя, транспортирующим газом являлся аргон.

Микротвердость в поперечном сечении покрытия исследовалась по глубине и ширине поперечного сечения на предварительно полученных микрошлифах при помощи микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Исследования проводились по глубине покрытия перпендикулярно основе с шагом 0,05 мм, по ширине покрытия параллельно основе – с шагом 0,2 мм.

Как видно из графиков изменения микротвердости по глубине покрытия (рис. 1, а), для всех шагов наплавки валиков микротвердость находится в пределах 3500...4500 МПа без значительных колебаний, другими словами, распределение микротвердости по глубине покрытия равномерное. Сильное

изменение микротвердости связано только с переходом от материала покрытия к материалу основы, когда микротвердость уменьшается до 2000...2500 МПа.

а)



б)

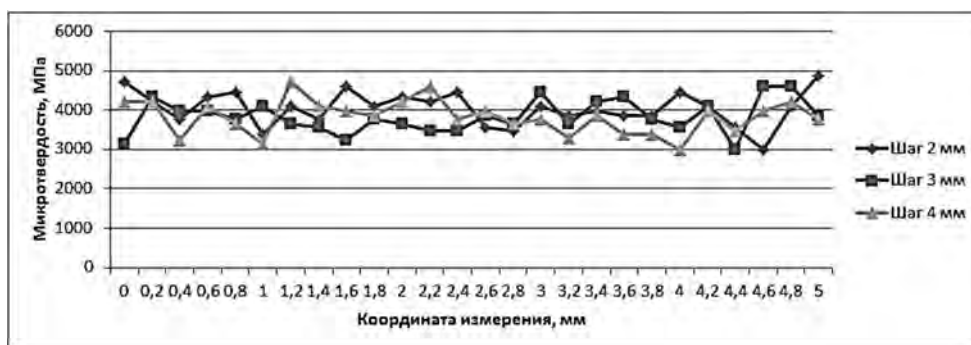


Рис. 1. Распределение микротвердости в покрытии из сплава ПГ-12Н-01 при скорости наплавки 80 мм/мин и площади пятна сканирования  $4 \times 0,5$  мм: а – по глубине покрытия; б – по ширине покрытия параллельно основе

Изменения микротвердости в продольном направлении сечения покрытия параллельно основе показаны на рис. 1, б для аналогичных режимов наплавки. Как видно из рис. 1, б, по ширине покрытия микротвердость находится также в пределах 3500...4500 МПа и распределена достаточно равномерно.

Графики, приведенные на рис. 1, позволяют заключить, что при лазерной наплавке с поперечным сканированием распределение микротвердости в поперечном сечении покрытия из никелевого сплава ПГ-12Н-01 равномерное, резкие колебания микротвердости отсутствуют. По всему сечению покрытия микротвердость находится на уровне 3500...4500 МПа. Можно предположить, что лазерная наплавка с поперечным сканированием сплавов системы Ni–Cr–B–Si позволяет получить покрытие с однообразным равномерным распределением фаз по всему объему покрытия, чему способствует интенсивное перемешивание материала покрытия в ванне расплава.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of overlapping tracks on microstructure evolution and corrosion behavior in laser-melt magnesium alloy / Y. C. Guan [et al.] // Materials and Design. – 2013. – Vol. 52. – P. 452–458.
2. Laser Institute of America, LIA Handbook of Laser Material Processing / Edited by J. F. Ready. – Orlando: Magnolia Publishing Inc., 2001. – 715 p.

УДК 621.793:66.088

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫЕ  
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫЕ. И. ЭЙСИМОНТ<sup>1</sup>, Т. Ф. ГРИГОРЬЕВА<sup>2</sup>, Е. В. ОВЧИННИКОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы

Гродно, Беларусь

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

Новосибирск, Россия

Композиционные материалы, получаемые из различных по своей структуре матриц, могут удовлетворить потребность современной промышленности в увеличивающемся спектре применения различного типа конструкционных материалов. Спектр использования современных композиционных материалов достаточно широк благодаря принципиально новым возможностям, которые открываются при получении композитов. Данный вид материалов применяется для создания современных авиационных лайнеров, например МС-21, космических аппаратов «Союз», товаров широкого потребления – расчесок, ручек, обложек для тетрадей и книг и т. п. Данная широкая гамма товаров требует новых подходов к созданию различного типа композитов. В частности, в последние десятилетия интенсивно развивается механохимический синтез различного типа модификаторов и композиций на основе природных и синтетических материалов. Применяемые технологические решения в области механохимии позволяют создавать композиционные наноматериалы, композиты, получаемые литьем при непосредственном воздействии на расплав или непосредственно в процессе кристаллизации, когда существуют одновременно жидкая и твердая фазы. Это достигается путем воздействия физических полей и механическим перемешиванием расплава за счет контролируемых химических реакций.

Механоактивированные частицы возможно вводить, в том числе, в металлические, керамические или полимерные матрицы, что позволяет получать огромную комбинацию механоактивированных композиционных материалов.

Обычно композиционные материалы состоят в общем случае из одной или нескольких дисперсных фаз, распределенных случайным образом в виде микро- или наноразмерных частиц в объеме модифицируемого материала. В случае, если в полимерную или какую-нибудь другую матрицу вводят волокна двух или более типов, размер которых превышает микронный размер, можно говорить о гибридных композиционных полимерных материалах. В настоящее время появился новый класс композиционных материалов, в том числе и механоактивированных, – наногибридные композиционные материалы.

Получение композитов из полимерных материалов с дополняющими друг друга физическими и механическими свойствами: прочности, модуля Юнга, теплостойкости, морозостойкости, износостойкости, позволяет изготавливать

детали сложной формы, в том числе с меньшей плотностью, по сравнению с металлической или керамической матрицей, что дает возможность обеспечить меньший расход топлива в автотракторостроении, космической и авиационной технике, высокую скорость для спортивного инвентаря (бобслей, парусный спорт и т. п.), а также дальность полета различного типа ракет. Обеспечение данного эффекта возможно путем применения композиционных механоактивированных материалов.

Одним из основных направлений развития современного полимерного материаловедения является улучшение эксплуатационных характеристик реактопластичных полимеров. Модифицирование полимерной матрицы в основном проводится для увеличения ударной вязкости реактопласта и композиций на его основе. В большинстве случаев для получения композиционных материалов на матрицах различной природы используется методология, основанная на следующей схеме: состав --> технология --> структура ---> свойства. В том числе данный подход позволяет формировать композиционные материалы на основе реактопластичной матрицы. Возможность реализации данной методологии позволяет управлять физическими, химическими, механическими и другими характеристиками формируемых композиционных материалов, в частности на эпоксидной матрице, модифицированной полимер-силикатными наноразмерными частицами.

В последние десятилетия для получения современных модификаторов, применяемых в химической промышленности, медицине, машиностроении, используется технология механохимического синтеза, заключающегося в одновременном протекании как механического воздействия на модифицируемый материал, так и целенаправленного химического синтеза. В результате синергического воздействия формируются материалы, качественно отличающиеся по свойствам от исходных материалов, участвующих в синтезе модификатора. В ходе проведенной работы рассмотрена морфология механоактивированных частиц. Согласно представленным данным на композиционный материал на основе эпоксидной смолы, модифицированной нанодисперсными механоактивированными частицами поливинилового спирта и поливинилбутерала, имеет место развитая морфология. Морфология поверхности сколов полимера изменяется с изменением разрешения съемки поверхности скола. Изучены триботехнические характеристики композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы, модифицированной механоактивированными частицами частиц каолинит-ПВС, каолинит-поливинилбутераль. Показано, что кластерная структура механоактивированных частиц каолинит-ПВС, каолинит-поливинилбутераль, представляющих сочетание наноразмерных элементов полимерной фракции и олигомерных продуктов различной массы, расположенной на поверхности ультрамалой или наноразмерной частицы каолинита, позволяет сформировать в зоне фрикционного контакта перенесенные (разделительные) слои, синергически сочетающие наиболее благоприятные триботехнические характеристики для металлополимерных пар трения.

УДК 621.791

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ НАХЛЕСТОЧНЫХ  
И Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СРЕДЕ ANSYS

С. В. БОЛОТОВ, Д. Н. ЮМАНОВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Разработаны математические модели электротермодеформационных процессов контактной рельефной сварки нахлесточных и Т-образных соединений, отличающиеся от известных учётом электрофизических свойств деталей и динамики изменения тока в процессе сварки на основе имитационного моделирования электрической цепи контактной машины. Модели реализованы в модуле совмещенного анализа Thermal-Electric ANSYS Workbench.

Получены картины распределения плотности тока и температурных полей при сварке нахлесточных соединений из низкоуглеродистых сталей толщиной 2...4 мм, а также Т-образных соединений пластины из стали Ст3 и винта М8 из стали 20 при изменении сварочного тока, времени сварки и усилия сжатия электродов с расплавлением металла свариваемых деталей и без расплавления (соединение в твёрдой фазе при энергосберегающих режимах). Установлены максимальные концентрации сварочного тока в зоне контакта рельефа к поверхности свариваемой пластины, определен диапазон температур нагрева сварного соединения и электродов контактной сварочной машины.

Оценку адекватности разработанных математических моделей проводили на основании сравнительного анализа результатов моделирования и экспериментальных исследований. В качестве входной управляемой переменной выступало время сварки. Постоянными сохранялись геометрические размеры свариваемых деталей, форма рельефа, величина сварочного тока и усилие сжатия электродов. Выходной переменной для оценки адекватности модели являлся диаметр литой зоны взаимного расплавления свариваемых деталей для нахлесточных соединений, ширины и высоты области расплавления для Т-образных соединений, которые определялись по макрошлифам соединения при экспериментальных исследованиях. Расхождение экспериментальных и расчётных данных составило 7,8 %...9,7 %, что подтверждает адекватность математических моделей.

Разработана и внедрена в образовательный процесс методика математического моделирования процесса контактной рельефной сварки нахлесточных и Т-образных соединений в среде ANSYS. На результатах математического моделирования может базироваться определение энергосберегающих параметров режима контактной рельефной сварки.



УДК 537.523.5:621.791.75

ОЦЕНКА ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ СТОЛБОМ  
СВАРОЧНОЙ ДУГИ И ОБРАЗЦОМ, ВНЕСЕННЫМ В СТОЛБВ. В. ГЛУЩЕНКО, А. И. ЛЯПИН  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Теплообмен плазмы с помещенным в нее телом часто описывается дифференциальными уравнениями гидродинамики. При этом особое внимание уделяется коэффициенту теплоотдачи плазмы, который имеет практическое значение. Применение указанных уравнений к положительному столбу сварочной электрической дуги имеет свои особенности. Температура плазмы, особенно в центральной части столба, составляет порядка  $10^4$  град. При такой температуре, например, критерий Рейнольдса равен нулю, что ограничивает дальнейшие вычисления. Поэтому при расчетах коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от критериальных уравнений, вытекающих из преобразований дифференциальных уравнений гидродинамики, в рассматриваемом случае приходится отказаться.

В работе ограничимся расчетом минимального количества энергии, необходимого для нагревания образца до определенной температуры с учетом максимальных потерь в области нагрева.

Для обеспечения макроскопического динамического нагрева образца, внесенного в положительный столб сварочной дуги, без включения его в электрическую цепь необходимо стационарное выполнение равенства

$$\delta Q_1 = \delta Q_2, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – количество энергии, необходимое для нагревания образца до определенной температуры;  $Q_2$  – количество энергии, поступающей на образец.

В случае плавления образца величина  $Q_1$  определяется известным выражением

$$\delta Q_1 = dm \cdot (c \cdot (T_w - T) + \lambda), \quad (2)$$

где  $dm$  – масса элемента образца;  $c$ ,  $T_w$ ,  $T$ ,  $\lambda$  – удельная теплоемкость, температура плавления, начальная температура и удельная теплота плавления образца соответственно.

Полагая, что приток энергии к образцу из плазмы положительного столба происходит за счет принудительной конвекции и с учетом того, что по мере нагревания образца он может терять энергию за счет излучения, величину  $Q_2$  можно описать следующим соотношением:

$$\delta Q_2 = dS \cdot d\tau \cdot (\alpha \cdot (T_{nl} - T_w) - \sigma \cdot T_w^4), \quad (3)$$

где  $dS$  – элемент площади контакта образца с плазмой положительного столба;  $d\tau$  – время взаимодействия;  $\alpha$  – коэффициент принудительного конвекционного теплообмена;  $T_{nl}$  – температура плазмы в области контакта с образцом.

В частном случае образца цилиндрической формы величины  $dS$ ,  $dm$  и  $d\tau$  можно выразить через характеристики образца и положительного столба:

$$dm = \rho \cdot dV = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot dx; \quad (4)$$

$$dS = \pi \cdot d \cdot dx; \quad (5)$$

$$d\tau = \frac{dq}{I} = \frac{\rho_0 \cdot dV}{I} = \frac{\rho_0 \cdot S \cdot \lambda_0}{j \cdot S} = \frac{\rho_0 \cdot \lambda_0}{j}, \quad (6)$$

где  $\rho$ ,  $d$ ,  $dx$  – плотность материала, диаметр и высота элемента образца;  $\rho_0$  – объемная плотность зарядов одного знака в плазме;  $\lambda_0$  – средняя длина свободного пробега ионов в плазме;  $j$  – плотность разрядного тока.

Подстановка (2)–(6) в (1) и решение полученного равенства относительно коэффициента  $\alpha$  приводит к следующему выражению:

$$\alpha = \frac{\rho \cdot d \cdot (c \cdot T_w + \lambda)}{4 \cdot \rho_0 \cdot \lambda_0} \cdot j + \sigma \cdot T_w^4. \quad (7)$$

По (7) были проведены расчеты значения  $\alpha$  для сварочной дуги постоянного тока длиной 5...7 мм, свободно горящей между вольфрамовыми электродом диаметром 2 мм и пластиной, в воздухе при нормальном давлении. Вычисления проводились для оси столба. Расчеты показали, что даже при температуре столба, равной  $T_c = 2 \cdot 10^4$  К не может произойти расплавление вольфрамового образца, внесенного в положительный столб и не включенного в цепь разряда. Это означает, что объемной плотности энергии плазмы в положительном столбе при выбранном режиме дуги недостаточно, чтобы за счет принудительной конвекции нагреть образец до температуры плавления.

УДК 621.793

## ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ

О. Г. ДЕВОЙНО<sup>1</sup>, А. П. ПИЛИПЧУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь

Минск, Беларусь

Лазерная обработка характеризуется высокой эффективностью и позволяет получать уникальные свойства поверхности деталей, недостижимые в рамках традиционных технологических подходов [1]. В технологии лазерной обработки основными параметрами являются плотность лазерного излучения и время его взаимодействия с поверхностью, варьируя которые можно обеспечить формирование требуемых свойств поверхностного слоя. Особенностью лазерной обработки является немонотонность распределения температуры по зоне воздействия. При этом необходимо учитывать, что в результате неравномерных нагрева, высоких скоростей охлаждения зоны обработки и изменений объемов материала вследствие температурного расширения возникают остаточные напряжения. Остаточные напряжения, алгебраически складываясь с рабочими (внешними) напряжениями, могут их усиливать или ослаблять, способствовать образованию трещин и последующего разрушения детали.

Выполнен расчет термических напряжений для призматического стержня сечением  $15 \times 10$  мм из чугуна СЧ20 при движении лазерного луча мощностью 1 кВт со скоростью 200 и 300 мм/мин. Была выполнена дискретизация сечения стержня на квадратной сетке  $10 \times 10$ . Результаты расчета напряжений на этапе нагрева для случая перемещения источника со скоростью 200 мм/мин представлены на рис. 1 и 2.

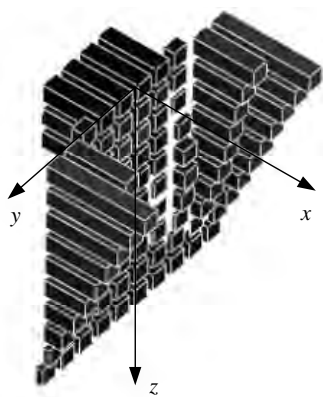


Рис. 1. Температурные напряжения в поперечном сечении стержня в результате нагрева (упругий расчет)

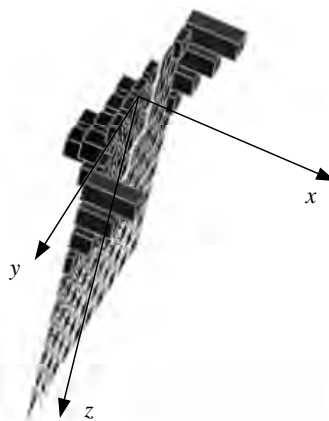


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений по сечению образца при скорости перемещения луча 200 мм/мин

На первом этапе выполнен упругий расчет (см. рис. 1), в результате которого значение максимального напряжения составило 335 МПа, что превышает предел прочности СЧ20, принятого равным 200 МПа. На рис. 2 представлено распределение остаточных напряжений по сечению образца при скорости перемещения луча 200 мм/мин, определенное на основе метода переменных параметров упругости [2]. Для анализа напряженного состояния на рис. 3 представлены кривые распределения остаточных напряжений в плоскости  $xOz$  (центр стержня) и в плоскости боковой поверхности стержня для скорости 200 мм/мин (см. рис. 3, *а*) и скорости 300 мм/мин (см. рис. 3, *б*). Анализ представленных результатов показывает, что в центре стержня формируются сжимающие напряжения (кривая 1), а по краю стержня – растягивающие напряжения (кривая 2). В результате установлено, что максимальное растягивающее напряжение располагается по краям стержня и составляет 149 МПа при скорости 200 мм/мин и 162 МПа – при скорости 300 мм/мин.

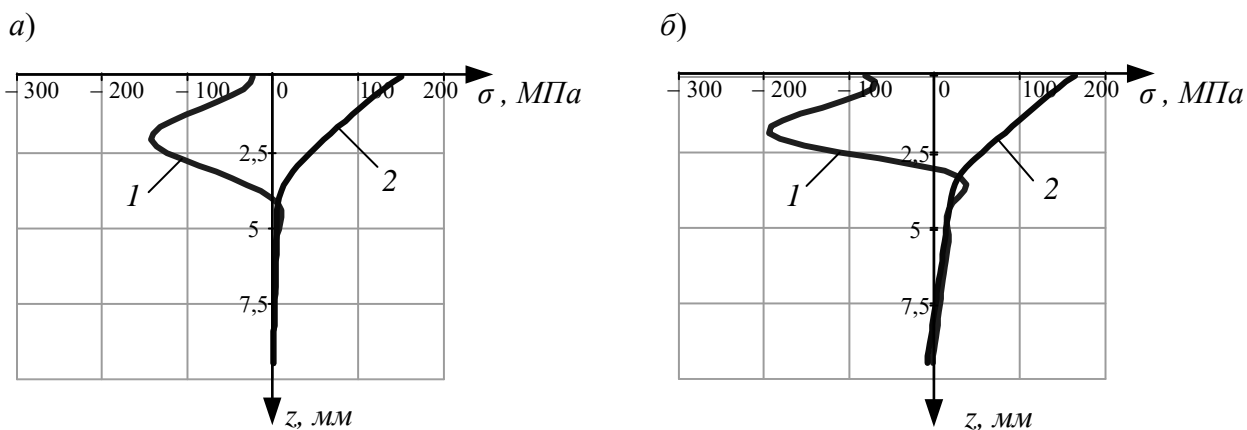


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по сечению образца: *а* – скорость 200 мм/мин; *б* – скорость 300 мм/мин

Данную особенность необходимо учитывать при определении параметров лазерной обработки, т. к. в процессе дальнейшей эксплуатации детали растягивающие напряжения приводят к понижению усталостной прочности и в ряде случаев износостойкости [3]. Уменьшить область растягивающих напряжений возможно в результате определения оптимальных скоростей перемещения лазерного луча и перекрытия лазерных дорожек.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – Москва: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Биргер, И. А. Неравномерно нагретые стержни с переменными параметрами упругости / И. А. Биргер // Расчеты на прочность. – Москва: Машгиз, 1961. – Вып. 7. – С. 76–109.
3. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – Москва: Машиностроение, 1978. – 592 с.

УДК 621.791

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ И РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВАРИВАЕМОСТИ

С. А. КОРОЛЁВ

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Москва, Россия

В процессе проектирования сварной конструкции и технологии ее изготовления основными параметрами, которые имеют наиболее значимое влияние на качество и надежность конечной продукции, являются [1]: конструктивное оформление сварного соединения, марка основного и сварочного материалов, погонная энергия сварки.

Конструктивное оформление сварного соединения может быть выбрано на основе прочностного расчета, в том числе на выносливость, в результате действия  $N$ -го количества случаев нагружения с заданным числом циклов. В результате такого анализа может быть обоснован выбор глубины проплавления и высоты усиления сварного шва.

Марка основного и сварочного материалов, а также погонная энергия сварки, определяются на основе испытаний на свариваемость.

При испытаниях на свариваемость требуется исследование влияния как минимум двух значений погонной энергии: номинальной (рекомендуемой производителем стали) и форсированной (для моделирования ситуации, при которой происходит отклонение от рекомендованной технологии с целью повышения производительности).

Перечень показателей, определяющих свариваемость, может быть определен на основе анализа физических и металлургических процессов.

При сварке плавлением низко- и среднеуглеродистых сталей имеют место следующие процессы [2–4].

1. Кристаллизация и оплавление границ зерен ОШЗ. Этот процесс происходит в условиях действия высокотемпературных сварочных деформаций, т. е. имеется возможность образования ГТ в шве и ОШЗ.

2. Интенсивный рост зерна, диффузия водорода, превращение аустенита в условиях действия низкотемпературных и остаточных напряжений. Эти процессы могут привести к образованию ХТ.

3. Структурные превращения, которые завершаются после охлаждения, формируют механические свойства.

Для сравнительной оценки между собой различных основных и сварочных материалов, а также технологий и условий сварки, разработаны, действуют и используются соответствующие стандарты: для оценки сопротивляемости образованию ГТ и ХТ, для оценки влияния СТЦ на механические свойства.

Данные подходы не позволяют оценивать свариваемость реальной конструкции. Для оценки свариваемости реальных изделий в настоящее время

используется подход, связанный со сваркой полноразмерных конструктивно-подобных образцов.

Для использования результатов экспериментальных испытаний по оценке свариваемости для условий сварки реальных изделий возможно применение цифровых моделей. Назначение цифровой модели – получение значений «критических технологических нагрузок», которые трудно получить при проведении эксперимента. Далее эти нагрузки можно сравнивать с «действующими нагрузками», полученными при моделировании.

Оценка сопротивляемости сварных соединений образованию ХТ выполняется по ГОСТ 26388–84. В качестве показателя сопротивляемости образованию ХТ используется минимальное напряжение, при котором обнаружена ХТ. Цифровая модель этих испытаний позволяет учесть факторы, которые не учитываются в действующем ГОСТ: остаточные сварочные напряжения, свойства металла сварного шва, реальная геометрия сварного шва (усиление шва, глубина проплавления).

На примере сварки углеродистой стали аустенитной проволокой видно, что значение напряжения, определенное по методикам ГОСТ, значительно отличается от того, при котором реально происходит разрушение образца.

Оценка сопротивляемости сварных соединений со стыковыми швами образованию ГТ выполняется по ГОСТ 26389–84. В качестве показателя сопротивляемости образованию ГТ используется минимальная скорость, при которой обнаружена ГТ. Цифровая модель этих испытаний позволяет получить критическую скорость растяжения металла шва в процессе кристаллизации, в то время, как ГОСТ регламентирует определение скорости перемещения края образца.

Оценка влияния сварочного термического цикла на механические свойства выполняется при помощи образцов, которые перед испытанием подвергаются тепловой обработке (ГОСТ 23870) с разной интенсивностью охлаждения (время охлаждения от 800 °С до 500 °С).

Проведение указанного комплекса исследований позволяет сделать обоснованный выбор конструктивного оформления сварного соединения, основного и сварочных материалов, погонной энергии сварки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. / Н. П. Алешин [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2004.
2. Теория сварочных процессов: учебник / В. М. Неровный [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.
3. Теория свариваемости сталей и сплавов / Под ред. Э. Л. Макарова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
4. **Макаров, Э. Л.** Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э. Л. Макаров. – Москва: Машиностроение, 1981.

УДК 621.791.754

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ ЗАЩИТНОЙ СРЕДЫ SF<sub>6</sub>

А. О. КОРОТЕЕВ, Е. А. ФЕТИСОВА, В. Д. ДОЛГАЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Перспективным направлением развития технологий дуговой сварки является разработка способов модификации защитной газовой среды, что позволяет эффективно воздействовать на характер плавления электродной проволоки, переноса присадочного металла через дуговой промежуток, проплавление основного металла. С точки зрения снижения чувствительности к водородному охрупчиванию, перспективным модификатором, рассматриваемым в ряде публикаций, является гексафторид серы SF<sub>6</sub>. Он позволяет не только существенно изменить характеристики дугового промежутка, но и снизить чувствительность материала к водородному охрупчиванию, что особенно актуально для сталей повышенной прочности.

Важным вопросом является стабильность горения дуги и характер переноса электродного металла, т. к. фтор обладает высоким потенциалом ионизации. При проведении экспериментальных исследований обнаружено, что эффективным способом стабилизации процесса при введении SF<sub>6</sub> в защитную среду Ar + CO<sub>2</sub> является повышение значения напряжения на дуге. Это несколько повышает мощность дугового разряда и делает его достаточно стабильным, но отличающимся от стандартных условий. В частности, отмечен эффект возникновения кратковременного струйного переноса электродного металла при разрыве жидкой перемычки между каплей и присадочной проволокой при коротком замыкании. Этот эффект проявляется на значениях скорости подачи присадочной проволоки 7,7 м/мин (что соответствует силе тока 246...254 А) и выше и тем сильнее, чем большее количество SF<sub>6</sub> вводится в дуговой промежуток, и чем выше значение напряжения на дуге при этом (рис. 1).

По-видимому, основной причиной этого является наличие большого количества паров металла, обусловленных вскипанием перегретого металла в момент разрыва перемычки, существенно облегчающих повторное зажигание дуги. При этом напряжение становится существенно большим необходимого уровня, что приводит к переходу в струйный режим переноса, даже на «докритических» значениях силы тока. Работы в данном направлении продолжают проводиться.

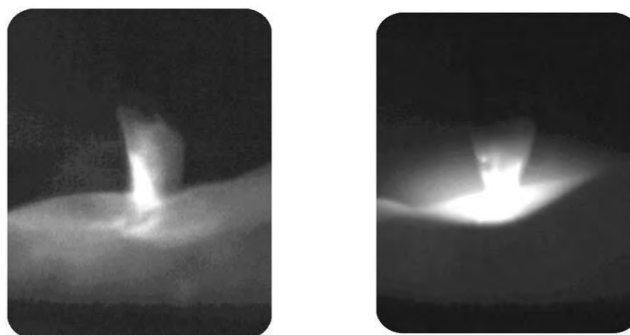


Рис. 1. Кратковременное возникновение струйного переноса при разрыве перемычки жидкого металла

УДК 621.643.053:621.7

СВАРКА КОРНЕВОГО СЛОЯ ШВА КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВ ТРУБ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА  
И ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ КРОМОК НА КАЧЕСТВО  
ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ

П. А. КРЮЧКОВ, Н. В. КОБЕРНИК, С. В. ГУРКИН

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Москва, Россия

Одним из основных процессов строительства магистральных газопроводов большого диаметра является сварка кольцевых стыков труб. Может выполняться как сварка поворотных, так и неповоротных кольцевых стыков труб. Сварка неповоротных стыков осуществляется при невозможности вращать трубы из-за их размеров или длины свариваемой плети, а также при сварке захлестов. Одним из способов сварки неповоротных стыков является односторонняя автоматическая сварка плавящимся электродом в среде защитных газов [1].

Наиболее высокие требования предъявляются к корневому слою шва магистральных трубопроводов, т. к. качество его выполнения влияет на механические характеристики стыков газопроводов [2]. Для сварки корня используют специальные способы сварки, которые реализуют за счет управления переносом капель электродного металла путём изменения сварочного тока и напряжения по определенному алгоритму, что приводит к сварке с принудительными короткими замыканиями. Так как в момент касания капли сварочной ванны дуга не горит, то и общие тепловложения, сообщаемые сварному соединению, уменьшаются, при этом такая сварочная ванна обладает меньшим объемом по сравнению со сваркой классическими способами. Известно несколько способов сварки с использованием регулирования капельного переноса, среди них: STT, WiseRoot, SpeedRoot, УКП и др. Однако данные способы сварки остаются достаточно чувствительны к изменениям параметров сборки свариваемых кромок.

В работе на примере способа УКП производилась оценка влияния параметров сборки, а именно величины смещения кромок, на процесс формирования корневого слоя шва. Сборка стыков осуществлялась согласно требованиям ПАО «Газпром» для данного способа сварки, а именно величина зазора между кромками должна быть в диапазоне 3...4 мм, а смещение свариваемых кромок на всем периметре стыка должно быть не более 2 мм, на участках длиной 1/6 периметра трубы не должно превышать 3 мм [1]. В связи с плохим качеством труб большого диаметра, а именно невозможностью соблюдения



равномерной обработки кромок труб, их овальностью, сохранить постоянство параметров сборки невозможно [3].

В процессе сварки и по оценке шлифов свариваемых соединений было установлено, что при изменении величины смещения кромок увеличивается вероятность появления дефектов, таких как прожог приближенной или непровар удаленной от дуги кромки. Это связано с неравномерным распределением тепла сварочной дуги, сообщаемого свариваемым кромкам. Сварочная дуга по принципу минимума напряжения занимает такое положение, чтобы для ее поддержания затрачивалось наименьшее количество энергии [4], что приводит к тому, что в процессе сварки сварочная дуга дольше находится на приближенной к сварочной горелке кромке, увеличивая таким образом количество поступающей в кромку теплоты и объем наплавленного металла.

Для предотвращения образования таких дефектов предложен способ, в основе которого лежит корректировка параметров режима по задержке на кромках при изменении величины смещения кромок, что приводит к изменению времени нахождения дуги как на приближенной, так и на удаленной кромке.

Для оценки способа была проведена сварка неповоротных кольцевых стыков труб диаметром 1220 мм и толщиной 19 мм со смещением кромок 0...3 мм во всех пространственных положениях, в результате чего удалось получить зависимости параметров режима сварки методом УКП от параметров сборки стыка.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТО Газпром 15-1.1-002–2023.** Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Технологии сварки промышленных и магистральных трубопроводов.
2. **Доронин, Ю. В.** Тенденции и проблемы развития односторонней дуговой сварки / Ю. В. Доронин // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 3 (16). – С. 47–56.
3. Опыт разработки и применения современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов / О. Б. Гецкин [и др.] // Сварка и Диагностика. – 2010. – № 10. – С. 51–57.
4. **Захаренко, А. И.** Уменьшение влияния сборочных отклонений на качество формирования корневого слоя шва при дуговой сварке: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / А. И. Захаренко.

УДК 621.79

СВАРКА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХ  
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. Г. ЛУПАЧЁВ, А. О. КОРОТЕЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Аустенитные стали, легированные титаном, ниобием либо танталом, с целью предотвращения межкристаллитной коррозии, по своей природе склонны к локальным разрушениям при длительной высокотемпературной эксплуатации в условиях термомеханического нагружения в сочетании с коррозионной активностью транспортируемой среды.

Разрушение сварного соединения происходит в зонах термического влияния основного металла, находящихся в течение длительного времени в диапазоне температур 600 °С...650 °С, в процессе охлаждения после выполнения сварки.

В рассматриваемых сталях основная доля от общего количества углерода находится в связанном в стойкие карбиды состоянии, распределенные в  $\gamma$ -твердом растворе. Как правило, это карбиды Ti и Nb. Их нагрев до высоких температур (1250 °С...1300 °С) приводит к растворению с последующим высвобождением углерода и внедрением в кристаллическую решетку аустенита. Атомы Ti и Nb при этом переходят в вакантные места узлов кристаллической решетки.

Повышение температуры приводит к возрастанию скорости диффузионных процессов. При этом подвижность атомов углерода значительно выше элементов стабилизаторов (Ti и Nb), что позволяет им стремительно покинуть тело зерна и выйти на периферию, оставаясь при этом в твердом растворе.

Если перегретую аустенитную сталь охладить с большой скоростью, то полученный  $\gamma$ -твердый раствор будет характеризоваться распределением карбидообразующих стабилизирующих компонентов внутри тела зерна аустенита с явно выраженным насыщением границ зерен углеродом. Последующий отпуск в случае послесварочной термообработки, либо отпуск предыдущих слоев воздействием термического цикла при многослойной сварке, приводит к тому, что атомы углерода, выпавшие из твердого раствора и рассредоточенные по границам зерен, заберут практически все атомы титана и ниобия, находящиеся в пограничных зонах зерна аустенита, образуя карбиды TiC и NbC. При этом новые атомы углерода, перемещающиеся из внутренних областей к периферии в результате диффузионных процессов уже не встретят необходимого количества атомов Ti или Nb. Вместо образования карбидов этих

элементов начнут образовываться карбиды Cr и Fe. Основной причиной этого является более высокая скорость диффузии углерода по сравнению с хромом, а хрома, по сравнению с Ti или Nb.

Указанные процессы, происходящие по границам зерен, приводят к их разупрочнению. Выпадение же карбидов в теле зерна, наблюдаемое на более поздних этапах старения, способствует упрочнению тела зерна. Неблагоприятное соотношение степени упрочнения зерна и разупрочнения его границ приводит к разрушению.

С целью уменьшения склонности к разрушениям рекомендуются следующие мероприятия:

- снижение количества углерода в материале аустенитной стали (ниже 0,02 %), что позволяет исключить возможность образования карбидов;
- снижение или полное отсутствие энергичных карбидообразующих элементов (Ti или Nb), либо повышение их количества в материале сверх концентраций, определяемой условиями образования и стабильного существования карбида.

На практике определены факты низкой склонности к разрушениям аустенитных сталей, легированных вместо Ti и Nb молибденом (М) или вольфрамом (W).

В аустенитных Cr–Ni сталях молибден и вольфрам являются менее активными карбидообразующими элементами по сравнению с хромом. Это означает, что сварочный термомодеформационный цикл в хромоникельмолибденовой аустенитной стали не вызывает существенного изменения состава карбидов, а следовательно, и заметного разупрочнения границ зерен на участке перегрева.

Эффективным способом решения проблемы обеспечения надежности сварных соединений при эксплуатации также является использование материалов, не склонных к разрушениям (сварочные присадочные проволоки Св-04Х17Н10М2, Св-02Х17Н10М2-ВИ).

В случае невозможности проведения термообработки в виде аустенизации сварных соединений рекомендуется:

- предварительная наплавка кромок электродами, в состав которых не входят стабилизирующие элементы;
- термообработка деталей с наплавленными кромками;
- применение сварочных материалов типа Э-04Х19Н11Г2М, без последующей термической обработки.

УДК 621.791.75

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ  
ИЗ СТАЛИ ASTM A335 Gr P91

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. МИНЬКОВ<sup>1</sup>, А. А. КОРОТЕЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В последние годы широкое применение в энергетике многих стран находят эффективно работающие при высоких температурах главные паропроводы из хромистой стали P91.

Лимитирующей проблемой, не позволяющей дальнейшую эксплуатацию паропроводов, является зарождение и развитие трещин 4-го типа в шве и зоне термического влияния сварных соединений.

При ползучести выявляют два типа межзеренного разрушения:

1) разрушение клиновидной трещиной, зарождающееся обычно в точке встречи трех зерен и затем непрерывно распространяющееся вдоль их границ от поверхности в глубину паропровода;

2) разрушение путем образования по границам зерен пор, которые увеличиваются со временем в размерах, сливаются и образуют сплошную трещину.

Клиновидные трещины образуются при более низких температурах, высоких напряжениях и высоких скоростях ползучести, а трещины, образовавшиеся из пор, при более высоких температурах, низких напряжениях и малых скоростях ползучести.

Отличительная особенность клиновидных трещин – гладкая поверхность разрушения, тогда как трещина, образовавшаяся из пор, имеет неровную поверхность.

За последние три десятилетия учеными и специалистами достигнут значительный прогресс, позволивший, благодаря введению некоторых легирующих элементов (бор, ванадий, ниобий, азот) в небольших количествах в основной металл и металл шва, создать микроструктуру стали с мелкодисперсным упрочнением (карбидами, карбонитридами и др.), а также регулировать размеры зерен, и тем самым повысить рабочие температуры с 500 °С до 650 °С.

Таким образом, ключевыми направлениями, позволяющими повышать эксплуатационный ресурс экономнолегированной стали P91 (0,1 % С, 9 % Cr, 1 % Mo, 0,18 % V, 0,08 % Nb, 0,08 % N, остальное Fe), являются:

– поиск оптимального химического состава, обеспечивающего получение требуемой структуры основы, дисперсных труднорастворимых фаз и их распределения по телу зерна, тормозящих явления ползучести;

– поиск оптимальных режимов предсварочной тепловой и физической обработки, термического цикла сварки с наложением термомеханической обработки, послесварочной термической обработки;

– поиск эффективных приемов создания требуемых напряженного состояния и химического состава в поверхностных дефектных слоях эксплуатируемых паропроводов;

– разработка режимов сварки с минимальной погонной энергией в защитной среде, исключающей попадание водорода в сварочную ванну и позволяющей введение такого горофильного элемента, как бор;

– поиск оптимального по составу и свойствам покрытия на шве и зоне термического влияния, исключающего процесс внутреннего окисления при эксплуатации паропровода;

– совершенствование методов диагностики и неразрушающего контроля состояния основного металла, металла шва и зоны термического влияния в процессе эксплуатации;

– разработка и поиск оптимальных режимов восстановительной термической обработки металла шва и зоны термического влияния в процессе эксплуатации паропровода в случае деградации механических свойств.

В настоящее время авторы работают над решением нескольких из указанных выше проблемных вопросов.

УДК 621.793.7:621.762

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ  
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙФ. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, В. А. ОКОВИТЫЙ,  
О. Г. ДЕВОЙНО, А. А. ЛИТВИНКОБелорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Наиболее благоприятно для промышленного нанесения из порошка оксид алюминия, который обладает высокой адгезионной и когезионной прочностью сцепления, достаточной твердостью и износостойкостью, довольно высокой прочностью связи в кристаллической решетке, использование процесса газотермического напыления. Создание специальных керамических композиционных материалов [1] связано с повышением качества плазменных покрытий для получения противометеорной защиты. Для создания из оксидов специальных керамических плазменных покрытий наибольшее распространение получили напыления с использованием в виде внешней среды – воздуха (до 60 % наработок) [2]. Он используется для восстановленных работ на важных деталях в разных отраслях современной техники. Поскольку при использовании напыления можно реализовывать спектр технологических процессов и вести напыление довольно широкой гаммы разных материалов при нужных специальных режимах на одном комплексе оборудования с минимумом затрат на специальную технологическую оснастку и способностью напыления довольно большой номенклатуры любых деталей. Но, к сожалению, на сам процесс плазменного создания покрытий действует много факторов. Главные из них: расход газа для плазмообразования, а также для транспортировки порошка; скорость перемещения обрабатываемой детали и самой подложки; скорость перемещения детали и подложки, дистанция подачи порошка для напыления; расход порошка для процесса напыления; подводимый ток для работы электрической дуги. На рис. 1 в качестве примера приведены характер зависимости при атмосферном давлении эффективности процесса плазменного напыления, параметр КИП (коэффициент использования порошка) в процентах от технологических условий плазменного напыления оксидного порошка –  $Al_2O_3$  с различным фракционным составом. Эффективностью защиты всех объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударная стойкость у используемых материалов. Высокопрочные суперматериалы применительно к объектам противометеорной защиты должны иметь необходимые требования – минимальная общая пористость, вязкопластичные свойства должны быть очень высоки, необходимая для покрытий твердость, что свойственно большому количеству керамических плазменных покрытий. Для порошкового материала  $Al_2O_3$  проведена оптимизация параметров APS на основании создания максимального КИМ. На полученных оптимальных технологических режимах для порошка  $Al_2O_3$  (с применяемой фракцией поряд-

ка 40...63 мкм, полученный расход газа для напыления  $R_N = 50$  л/мин, используемая дистанция для процесса напыления – 100 мм, поданный для плазмотрона ток – 500 А, скорость передвижения подложки  $V_n = 300$  мм/с, расход  $Al_2O_3$  порошка – 4,0 кг/ч) созданы покрытия с КИП – 63 %.

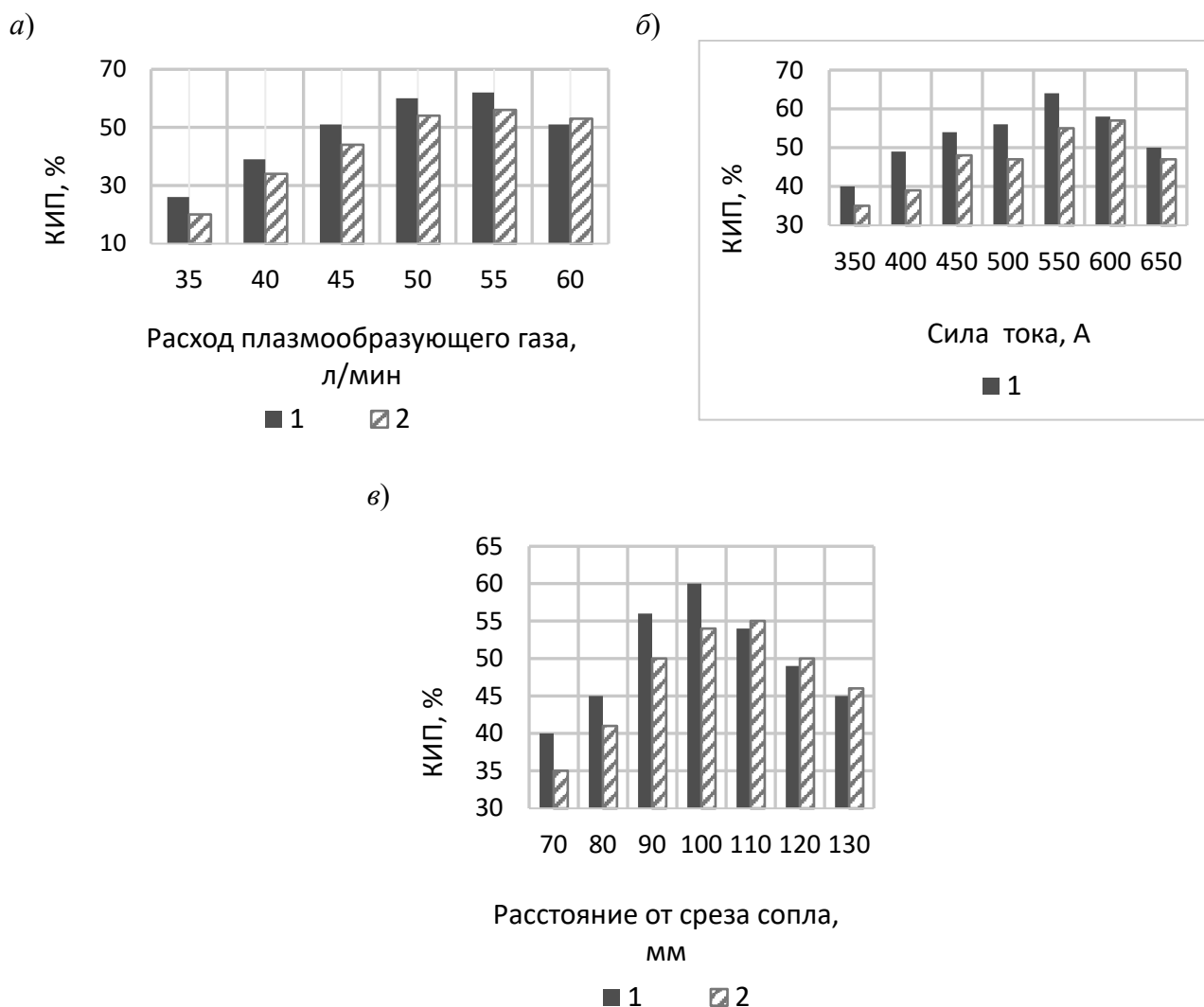


Рис. 1. Влияние технологических параметров процесса плазменного нанесения покрытий на КИП для применяемых порошков  $Al_2O_3$ : 1 – с применяемой фракцией порядка 40...63 мкм; 2 – с применяемой фракцией порядка 63...100 мкм; а – от расхода плазмообразующего газа азота  $N_2$ ; б – от силы подводимого тока электрической дуги  $I$ , А; в – от дистанции напыления  $L$ ; а –  $L = 100$  мм;  $I = 500$  А;  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч; б –  $L = 100$  мм;  $R_N = 50$  л/мин,  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч; в –  $I = 300$  А,  $R_N = 45$  л/мин,  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll / F. I. Panteleenko [et al.] // Science and Technique. – 2022. – № 21 (2). – P. 93–98.
2. Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. – 2016. – Вып. 5. – С. 357–364.

УДК 621.791.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ С ФТОРИДНО-ПЕРОВСКИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКИ

С. Г. ПАРШИН<sup>1</sup>, Ю. ГАО<sup>1</sup>, А. О. КОРОТЕЕВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Подводная дуговая сварка высокопрочных сталей применяется при монтаже и ремонте оффшорных, портовых и судовых конструкций. Типичные составы шихты для покрытых электродов и самозащитных порошковых проволок имеют шлаковые системы  $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-MnO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO-MnO}$ ,  $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MnO}$  [1]. В качестве основных шлаковых систем для покрытых электродов для подводной мокрой сварки сталей повышенной прочности используют композиции:  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и инновационную систему  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ .

Цель исследования – разработка редкоземельной газошлаковой системы покрытых электродов для подводной дуговой сварки высокопрочных сталей.

### Методы исследований.

Для подводной мокрой сварки использовали пластины  $200 \times 100$  мм из стали 09Г2С толщиной 10 мм. Подводную мокрую сварку производили на глубине 200 мм на стенде, который включал: электродержатель, резервуар, выпрямитель ВД-313, датчики тока и напряжения, компьютер, контроллер, электропривод, USB-осциллограф. Покрытые электроды имели коэффициент массы покрытия – 20 %, толщину покрытия – 0,8 мм, толщину водонепроницаемого лака – 0,04 мм. Покрытие изготавливали многослойным окунанием в смесь на основе жидкого стекла (в процентах):  $20\text{TiO}_2\text{-}30\text{LaF}_3\text{-}25\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-}10\text{CaCO}_3\text{-}3\text{Mn-}2\text{Si-}6\text{Ni-}1\text{Zr-}3\text{Al}$ . Для изготовления покрытых электродов использовали стержни диаметром 4 мм из стали Св-08А и Св-10Х16Н25АМ6.

### Результаты исследований.

Газошлаковое покрытие  $\text{TiO}_2\text{-LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6\text{-CaCO}_3$  при расплавлении образует рутил-фторидно-перовскитную систему, которая включает титанат кальция  $\text{CaTiO}_3$  (перовскит) и обладает следующими преимуществами: отсутствие оксидов, способствующих шлаковым включениям; улучшение экранирования сварочной ванны; снижение межфазного натяжения; снижение водорода за счет связывания гидроксильных групп при формировании в шлаках полимерных



алюмофторидных анионов [2]; выделение фаз  $\text{LaO}_2$ ,  $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ , которые способствуют улучшению сварочно-технологических свойств шлака и модификации микроструктуры шва.

Испытания опытных электродов диаметром 4 мм производили при обратной полярности на воздухе и при подводной мокрой сварке на глубине 200 мм. Испытания показали, что опытные электроды обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами, обеспечивают хорошее формирование плотных швов, легкое удаление шлака. При мокрой сварке электродами со стержнем Св-08А средняя величина сварочного тока в четырех режимах составила 159...215 А с отклонениями тока  $\pm 60...70$  А; средняя величина напряжения в четырех режимах составила 27...31 В с отклонениями напряжения  $\pm 5...7$  В при частоте коротких замыканий 5...7 Гц. При скорости сварки 2,1..2,6 мм/с ширина и высота шва составили 10...14 и 2...3,5 мм. При сварке электродами со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 средняя величина сварочного тока в четырех режимах составила 165...202 А с отклонениями тока  $\pm 65...70$  А; средняя величина напряжения в четырех режимах составила 27...32 В с отклонениями напряжения  $\pm 3,5...6$  В при частоте коротких замыканий 3...5 Гц. При скорости сварки 2,2...3,4 мм/с ширина и высота шва составили 12...16 и 2,5...4 мм.

Твердость наплавленного металла при подводной сварке и сварке на воздухе электродами со стержнем Св-08А составила 180...210 и 149...177 НВ, со стержнем Св-10Х16Н25АМ6 – 248...320 и 322...365 НВ при твердости основного металла 140...160 НВ.

### **Вывод.**

Разработаны покрытые электроды со стержнем из углеродистой и аустенитной стали для подводной мокрой сварки сталей повышенной прочности. Основой универсального покрытия электродов является редкоземельная газослаковая рутил-фторидно-перовскитная система  $\text{TiO}_2\text{-CaF}_2\text{-LaF}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ . Новые покрытые электроды обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами на воздухе и под водой и позволяют достичь равнопрочности при сварке сталей повышенной прочности.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Паршин, С. Г.** Материалы и технологии подводной сварки: монография / С. Г. Паршин. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. – 468 с.
2. **Рудской, А. И.** Электрохимическое удаление гидроксила и диффузионного водорода в алюмофтористых шлаках сварочных порошковых проволок / А. И. Рудской, С. Г. Паршин // Химия, науки о материалах: докл. Рос. акад. наук. – 2022. – Т. 504. – С. 62–66.

УДК 621.791.763.1

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРКАСА  
БЛОЧНЫХ ГАЗОРЕГУЛЯТОРНЫХ ПУНКТОВ  
МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Н. СИНИЦА, М. А. СИНИЦА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Блочные газорегуляторные пункты (ГРПБ) – это установки для снижения давления природного газа и поддержания его в требуемых пределах. Особенностью ГРПБ является размещение оборудования в одном или нескольких специальных контейнерах. Чаще всего ГРПБ имеет технологический блок и два вспомогательных (блок телеметрии и мини-котельная).

В последнее время ГРПБ изготавливают в виде металлических боксов (чаще всего металлический каркас, обшитый сэндвич-панелями), внутри боксов размещают газораспределительное и вспомогательное оборудование. Выбор материала каркаса зависит от габаритов и общего веса ГРПБ. Как правило, используют сортовой прокат, например, швеллеры, квадратные и прямоугольные трубы.

Блочные газорегуляторные пункты обычно изготавливаются по техническим требованиям конкретного заказчика. Конструктор стремится спроектировать ГРПБ в кратчайшие сроки, снизить его габариты и вес. С учётом того, что изготовление сварного каркаса занимает не менее 25 % от времени изготовления всего ГРПБ, требования к оптимальности и законченности конструкции каркаса весьма жёсткие.

Применение высокопроизводительных методов трёхмерного компьютерного моделирования позволяет в сжатые сроки спроектировать несколько вариантов конструкций ГРПБ, проанализировать их и выбрать оптимальный вариант.

В 2023 г. в строительном унитарном предприятии «Газстроймонтаж Могилев» при технической поддержке специалистов Белорусско-Российского университета внедрён метод проектирования ГРПБ с использованием трёхмерного компьютерного моделирования.

Конструктор задает значения основных габаритных размеров будущего ГРПБ, выбирает вариант конструкции каркаса, а также тип и размеры проката. На всех шагах задания исходных данных компьютер даёт рекомендации по оптимизации конструкции. После создания 3D-модели каркаса автоматически генерируются чертежи и спецификации сборочных единиц, а также чертежи всех деталей.

Применение 3D-моделирования позволило сократить время проектирования каркаса ГРПБ в среднем в 7 раз.

УДК 621.791

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖАТОЙ ДУГИ  
В АРГОНЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ  
ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

Д. Э. СОВЕТКИН, А. С. КЛИМОВ

Тольяттинский государственный университет

Тольятти, Россия

Для изделий из алюминиевых сплавов перспективным следует признать применение сварки сжатой дугой регулируемыми прямоугольными импульсами (РПИ) тока. Этот способ сварки позволяет регулировать интенсивность катодной очистки, характеризуется повышенной концентрацией энерговыделения, высокой проплавающей способностью и устойчивостью дуги во всех пространственных положениях. Широкие технологические возможности сжатой дуги с РПИ в полной мере проявляются при реализации гибридных и аддитивных технологий в машиностроении, судостроении и аэрокосмической отрасли.

Длительность импульса обратной полярности, являющаяся параметром РПИ, задается минимально возможной, позволяющей сочетать качественную катодную очистку и стойкость неплавящегося электрода. Ранее [1] установлено, что обратная полярность, по сравнению с прямой полярностью, позволяет в 2 раза повысить эффективную мощность дуги. Повышение скорости сварки и требований по качеству сварного соединения заставляют увеличивать длительность импульса обратной полярности, из-за чего возрастает тепловая нагрузка на неплавящийся электрод.

Устранение проблемы низкой стойкости неплавящегося электрода при сварке на РПИ тока с преобладанием длительности импульса обратной полярности достигается интенсивным водяным охлаждением. Известные конструкции электродов [2, 3] предусматривают применение запрессованных в медное основание тугоплавких вставок. Недостатком такой конструкции является уменьшение натяга в процессе циклических температурных нагрузок, что приводит к снижению эффективности охлаждения и выпадению тугоплавкой вставки из медного основания. На кафедре сварки ТГУ предложена оригинальная конструкция, представленная на рис. 1, которая обеспечивает прямой контакт охлаждающей жидкости через трубку подачи 4, с вольфрамовой вставкой 3 в медной обойме 2, устанавливаемой на держателе 1. Фиксация вольфрамовой вставки 3 относительно медной обоймы 2 выполняется паяным швом 5 [4].

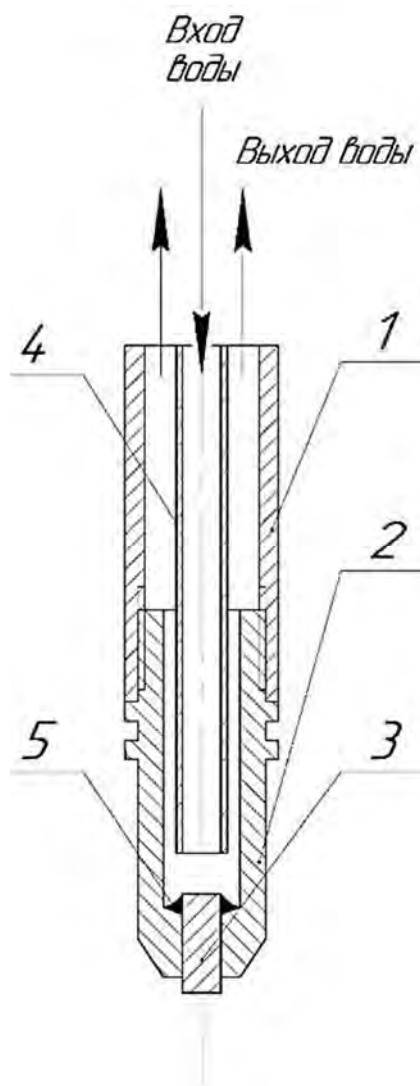


Рис. 1. Схема составного водоохлаждаемого электрода

Математический и физический эксперименты показали, что при диаметре вольфрамовой вставки 3 мм предлагаемая конструкция позволяет вести сварку на постоянном токе обратной полярности без разрушения электрода при токе до 80 А. При традиционном использовании электродов максимальная допустимая сила тока на обратной полярности составляет всего 40 А.

В [5] предложены эмпирические формулы для расчёта удельной эффективной мощности сжатой дуги на прямой  $q_{nn}$  и обратной  $q_{on}$  полярности:

$$q_{nn} = 19,65 - 5 \cdot 10^{-2} I ; \quad (1)$$

$$q_{on} = 35,06 - 0,107 \cdot I . \quad (2)$$

Расчеты по (1) и (2) позволяют утверждать, что эффективная мощность дуги, горящей на обратной полярности при токе 80 А, сопоставима с эффективной мощностью дуги на прямой полярности при силе тока 200 А.

Тепловыделение  $Q_c$  в стенку сопла плазмотрона может быть рассчитано в зависимости от длины  $l_c$  канала сжимающего сопла, расхода  $G_n$  и теплоемкости  $C_p$  плазмообразующего газа [5]:

$$Q_c = 8 \cdot \pi \cdot \int_0^{l_c} 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{I_n}{R_c}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{12 \cdot \pi \lambda z}{C_p \cdot G_n}\right]\right)^{\frac{2}{3}} dz. \quad (3)$$

Применение обратной полярности снижает тепловую нагрузку на сопловую часть плазмотрона, по сравнению со сваркой на прямой полярности с аналогичной эффективной мощностью. Кроме того, меньшее значение тока сварки на обратной полярности уменьшает напряженность электрического поля в сжимающем канале плазмотрона, устраняет опасность двойного дугообразования.

Применение предлагаемой конструкции электрода позволяет при сварке сжатой дугой с РПИ увеличивать длительность и допустимый ток импульсов обратной полярности. Таким образом, повышается эффективность катодной очистки и качество сварного соединения, увеличивается проплавливающая способность дуги, снижается тепловая нагрузка на сопло плазматрона.

Предложенная конструкция электрода реализована в плазмотронах для плазменной резки металлов. Доработанная конструкция плазмотронов реализована в универсальных ЧПУ-установках для плазменной резки и сварки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сидоров, В. П.** Эффективная мощность сжатой сварочной дуги с разнополярными импульсами тока / В. П. Сидоров, Д. Э. Советкин // Вектор науки Тольяттин. гос. ун-та. – 2021. – № 2. – С. 57–66.
2. Неплавящийся электрод для плазменно-дуговых процессов: пат. RU 2088391.
3. Неплавящийся электрод для дуговых процессов и способ сварки постоянным током неплавящимся электродом: пат. RU 2556256.
4. Неплавящийся электрод для дуговой сварки: пат. RU 2798648.
5. **Сидоров, В. П.** Энергетические характеристики сжатой сварочной дуги в аргоне: монография / В. П. Сидоров. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 235 с.

УДК 621.791.754

ВЛИЯНИЕ ГЕКСАФТОРИДА СЕРЫ В СОСТАВЕ  
ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ШИРИНУ  
ВАЛИКА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Е. А. ФЕТИСОВА, А. А. КОРОТЕЕВА, В. Д. ДОЛГАЯ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Основными геометрическими характеристиками сварного соединения являются ширина валика  $e$ , его высота  $g$  и глубина проплавления  $h$  основного металла. Несоблюдение этих размеров и неправильная форма проплавления приводят не только к отклонению от требований нормативной документации, но и к образованию дефектов, приводящих в процессе эксплуатации к разрушению конструкций. На геометрию сварного шва оказывают влияние следующие факторы: техника и способ сварки, выбор сварочных материалов, род и вид защитной газовой среды и др.

Одним из перспективных направлений снижения чувствительности материала к водородному охрупчиванию является модификация защитной газовой атмосферы галогенидными соединениями.

В работе рассмотрены особенности влияния модифицирования защитной газовой среды соединением  $SF_6$  на ширину валика наплавленного металла. Наплавка образцов осуществлялась на пластины из низкоуглеродистой стали с использованием значений параметров режима, полученных ранее и обеспечивающих наиболее стабильное протекание процесса в диапазоне значений  $I_{св} = 98...300$  А,  $U_d = 16...23$  В. Для точного введения гексафторида серы в защитную атмосферу использовалась специально разработанная установка, что вызвано необходимостью обеспечения точного соотношения компонентов.  $SF_6$  вводился в защитную среду  $Ar + CO_2$  в количествах от 0,5 % до 2 %. При этом общий расход трехкомпонентной защитной газовой среды оставался в пределах 12...15 л/мин.

Установлено, что при малых значениях силы сварочного тока (98...155 А) и количестве вводимого в состав защитной атмосферы  $SF_6$  до 0,5 % эффект от его воздействия выражен в снижении ширины валика наплавленного металла, что объясняется сжатием дуги из за высокого потенциала ионизации фтора. При этом с целью стабилизации процесса горения дуги и минимизации разбрызгивания электродного металла необходимо повышать напряжение, что, в свою очередь, приводит к некоторому росту ширины валика. Таким образом, присутствуют два противоположных по своему эффекту воздействия. При дальнейшем увеличении количества вводимого  $SF_6$  (свыше 1 %) наблюдается увеличение ширины валика наплавленного металла, что свидетельствует о преобладании эффекта, вызванного необходимостью повышения напряжения.

Исследования в данном направлении продолжаются и представляют повышенный интерес для развития представлений о происходящих в зоне горения дуги процессах при модификации защитной газовой среды.

УДК 621.791.754

ЧАСТОТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ  
И НАПЛАВКЕ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ SF<sub>6</sub>Е. А. ФЕТИСОВА, А. О. КОРОТЕЕВ,  
А. А. КОРОТЕЕВА, В. Д. ДОЛГАЯ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Важным вопросом при анализе эффективности введения SF<sub>6</sub> в защитную газовую атмосферу при сварке и наплавке является анализ характера переноса электродного металла. На сегодняшний день большинство технологий и подходов к управлению процессами сварки основаны на переносе электродного металла короткими замыканиями дугового промежутка и этот тип является наиболее стабильным, что обусловлено простотой контроля и управления электрическими параметрами. Короткое замыкание связано с резким скачком тока, хорошо фиксируется и дает возможность не только точного контроля объема наплавленного металла в единицу времени и тепловложения в основной металл, но и исключает свободное неконтролируемое перемещение жидких капель присадочного материала через дуговой промежуток.

Проведен ряд экспериментальных исследований, результаты которого показали, что введение SF<sub>6</sub> неоднозначно влияет на частоту коротких замыканий дугового промежутка. Здесь следует отметить два эффекта. Высокий потенциал ионизации фтора, как продукта высокотемпературной диссоциации SF<sub>6</sub> в дуговом промежутке, существенно затрудняет повторное возбуждение дуги, обладая «дугоподавляющим» эффектом. Это требует повышения мощности дугового разряда с точки зрения стабилизации процесса. С другой стороны, это приводит к тому, что дуга стабилизируется при повышенном напряжении в принципиально других условиях существования, что напрямую оказывает влияние на перенос электродного металла.

Установлено, что введение SF<sub>6</sub> в состав защитной атмосферы (Ar + CO<sub>2</sub>) в количестве до 2 % и относительно малых значениях скорости подачи (до 3,7 м/мин) снижает частоту коротких замыканий. В то же время повышение напряжения на 1,5 В и более позволяет не только сохранить ее на прежнем уровне (60...75 с<sup>-1</sup>), стабилизировав процесс, но и в некоторых случаях повысить до 80 с<sup>-1</sup>, начиная со скоростей подачи 5,3 м/мин (сила тока 195 А) и более.

Чем выше значение скорости подачи присадочной проволоки, тем эффект от влияния повышения количества SF<sub>6</sub> проявляется сильнее и, в некоторых случаях при скоростях подачи 7,7 м/мин и более, позволяет повысить частоту коротких замыканий на 20 % по сравнению с технологией сварки и наплавки в среде Ar + CO<sub>2</sub>.

Полученные результаты имеют важное значение для развития представлений о процессах, происходящих в зоне горения дуги при сварке, и работы в данном направлении продолжают авторами активно проводиться.

УДК 621.791.763

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ  
СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Е. А. ФЕТИСОВА, А. Г. ЛУПАЧЁВ, И. И. ЦЫГАНКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Несмотря на создание новых сталей и сплавов, сочетающих в себе многообразие легирующих элементов, которые позволяют такие материалы применять при изготовлении металлоконструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации различным динамическим, циклическим и статическим нагрузкам, использование сталей и сплавов с менее широким спектром легирующих элементов, не утратило свою актуальность. Превосходство последних заключается в возможности придания материалу необходимых специальных свойств путем введения только определенного элемента в большем количестве, чем для стандартных сталей и сплавов. Кроме того, такие материалы имеют невысокую стоимость.

Примером такой стали является сталь 110Г13Л. Содержание в ее составе большого количества только двух элементов (С и Mn), которые способствуют повышению прочности, твердости и износостойкости, позволяют изготавливать изделия, работающие в условиях воздействия ударных, ударно-абразивных нагрузок и удельных статических нагрузок. Такие металлоконструкции, как правило, изготавливаются методом литья и работают на износ.

Недостатком стали 110Г13Л является то, что она обладает плохой свариваемостью и в случае образования какого-либо дефекта, или в случае полного износа с возможностью восстановления методом наплавки, возникает ряд трудностей, заключающихся в процессе образования хрупких прослоек, развитием зон разупрочнения, а также изменением структуры металла зоны термического влияния, вследствие перераспределения легирующих элементов, и выделением карбидов и легкоплавких эвтектик по границам зерен. Всё это приводит к образованию и развитию кристаллизационных трещин.

Известно, что для получения качественного сварного соединения, а также для повышения его работоспособности, необходимо правильно подобрать способ сварки и сварочные материалы. Кроме того, важную роль играет техника сварки и технология сварочных процессов.

В настоящее время разработан широкий спектр сварочных материалов для сварки и заварки дефектов легированных сталей со специальными свойствами. Однако зачастую производители не уделяют внимания технологии сварки таких сталей.

Для сварки стали 110Г13Л применяют электроды с высоким содержанием Ni, который способствует измельчению и сохранению зерна аустенита, повышая при этом пластичность.

Кроме того, если использовать электроды на основе никеля в сочетании с другими легирующими элементами, например, как хром, молибден, то можно



получить сварные соединения с улучшенными показателями ударной вязкости, коррозионной стойкости и др.

Некоторые электроды, предназначенные для сварки легированных сталей со специальными свойствами, представлены в табл. 1.

Табл. 1. Электроды для сварки специализированных сталей

Марка электрода	Тип электрода по ГОСТ 10052–75 или тип наплавленного металла	Диаметр, мм	Основное назначение (применительно к сварке специализированных сталей)
ОЗЛ-19	10X23Н12Г	3,0; 4,0	Сварка высокомарганцевистой стали марки 110Г13Л
НИИ-48Г	Э-10X20Н9Г6С	3,0; 4,0; 5,0	Сварка низколегированных и высокомарганцевистых сталей типа 110Г13Л
ЭА-395/9	08X16Н26М6АГ2	3,0; 4,0; 5,0	Сварка легированных высокопрочных сталей типа АК и высокомарганцевистых сталей типа 110Г13Л
ЭА-981/15	10X15Н25М6Г2АФ	3,0; 4,0; 5,0	Сварка легированных высокопрочных сталей типа АК и высокомарганцевистых сталей типа 110Г13Л
ЭА-112/15	10X15Н25М6Г2АФ	3,0; 4,0; 5,0	Сварка легированных высокопрочных сталей типа АК и высокомарганцевистых сталей типа 110Г13Л

Если говорить о технологии дуговой сварки покрытыми электродами стали 110Г13Л, то необходимо отметить, что первый наплавленный (корневой) слой должен выполняться указанными выше электродами, а последующие слои заполняться стандартными электродами.

Предлагаемая технология позволяет минимизировать ширину хрупких кристаллизационных и диффузионных прослоек в зоне сплавления марганцевого аустенита с аустенитным хромоникелевым швом. Металлографически определено, что с увеличением содержания никеля до 26 % (электроды 08X16Н26М6АГ2) ширина хрупких кристаллизационных прослоек уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с аустенитным швом, содержащим менее 9 % никеля (электроды Э-10X20Н9Г6С).

Таким образом, применение указанной технологии снижает вероятность образования такого дефекта, как трещина, тем самым повышает срок эксплуатации конструкций, выполненных из сталей специального назначения. Кроме того, технология способствует снижению затрат на сварочные материалы путём заполнения большей части разделки кромок стандартными электродами, а не дорогостоящими плавящимися присадочными материалами на основе никеля.

УДК 621.791.763.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

С. М. ФУРМАНОВ, Д. Н. ЮМАНОВ, А. О. СЕРГЕЙЧИК

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Однофазный тиристорный регулятор мощности ТРМ-1М-У-720А может использоваться для замены тиристорных контакторов машин контактной сварки. В сочетании с виртуальным регулятором контактной сварки, построенным в программной среде LabVIEW, использование регулятора ТРМ-1М, благодаря его быстродействию, позволяет значительно расширить возможности машин при программировании режимов контактной точечной и рельефной сварки.

Регулирование мощности сварки осуществляется фазовым методом (режим Phase Angle) при воздействии на два встречно-параллельно включенных тиристора, угол открытия (Delay Triggering) которых прямо пропорционален постоянному напряжению 0...10 В от внешнего устройства управления (аналоговый выход АОО аналого-цифрового преобразователя напряжений NI USB 6251).

В регуляторе имеется возможность линейного изменения напряжения  $U$  на нагрузке для осуществления модуляции сварочного тока, например, при плавном нарастании мощности от подогрева к сварке. Для этого в регуляторе предусмотрен пакетный способ управления тиристорами в режиме плавного разогрева. Линеаризация входного воздействия по мощности  $U^2$  в регуляторе дает возможность задания мощности сварки пропорционально напряжению управления 0...10 В.

Для компенсации броска тока при коммутации индуктивной нагрузки сварочного трансформатора в регуляторе используется способ управления с заданием упреждения или задержки включения тиристора в первом периоде импульса тока.

Время реакции на входное воздействие в течение 8 мс позволяет корректировать мощность сварки в каждом периоде сетевого напряжения, что является непременным условием для построения адаптивной системы управления процессом контактной сварки.

Виртуальный регулятор контактной сварки в среде графического программирования LabVIEW, кроме регулирования мощности сварки с помощью ТРМ-1М, формирует циклограмму процесса с заданием временных параметров и включает блок управления электропневмоклапанами сварочной машины. В виртуальном регуляторе предусмотрено разделение времени протекания тока на этапы подогрева, нарастания мощности, максимальной мощности и термообработки с использованием различных критериев управления качеством сварки на каждом из участков.

УДК 621.791.03

## О ПОДТВЕРЖДЕНИИ СООТВЕТСТВИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РУЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

М. Ю. ЧЕШКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В настоящий момент в Республике Беларусь идет активная работа коммерческих структур по продвижению оборудования для ручной лазерной сварки, которая позволяет существенно повысить производительность.

Однако необходимо отметить, что данный способ сварки является чрезвычайно опасным производственным процессом и требует несомненно большего внимания к технике безопасности и применяемым средствам индивидуальной защиты, чем при обычных способах сварки. Высокий уровень травмоопасности при ручной лазерной сварке требует высокой квалификации и культуры производства от сварщиков, а также дополнительной теоретической и практической подготовки как сварщиков, так и специалистов сварочного производства, специалистов по охране труда.

Продвижение оборудования для ручной лазерной сварки на рынке Республики Беларусь и Евразийского экономического союза сопровождается обязательным подтверждением соответствия данного оборудования требованиям безопасности технических регламентов Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» (ТР ТС 010/2011), «Электромагнитная совместимость технических средств» (ТР ТС 020/2011). В связи с позиционированием данного оборудования как промышленного, процедура подтверждения соответствия требованиям безопасности ТР ТС 010/2011, ТР ТС 020/2011 проходит в более «простой» форме подтверждения соответствия – декларирования соответствия и в подавляющем большинстве случаев на основании протоколов испытаний, полученных от изготовителей данного оборудования или от неаккредитованных испытательных лабораторий (центров), что не позволяет быть должным образом уверенным в безопасности данного оборудования. Ситуация усугубляется отсутствием в Республике Беларусь аккредитованных в рамках Евразийского экономического союза испытательных лабораторий (центров), обладающих техническими возможностями и компетентностью для проведения полного комплекса необходимых испытаний в части подтверждения соответствия обязательным требованиям безопасности оборудования для ручной лазерной сварки.

Таким образом, продвижение на рынок Республики Беларусь оборудования для ручной лазерной сварки сопровождается недостаточным подготовительным процессом на предприятиях в части, необходимой для внедрения данного оборудования дополнительной подготовки персонала и недостаточными имеющимися техническими и компетентными возможностями аккредитованных испытательных лабораторий (центров), что, несомненно, может привести к увеличению случаев травмирования на производствах.

УДК 621.791.754

## ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА МАССИВНОЙ ФРЕЗЫ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКОЙ

Н. М. ШУКАН, В. В. ЛИПКОВ, А. Г. ЛУПАЧЁВ, А. О. КОРОТЕЕВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В настоящее время в машиностроении, станкостроении, металлургической промышленности Республики Беларусь чугуны являются одним из самых распространенных материалов. Это обусловлено его хорошими литейными свойствами, простотой изготовления требуемых форм, высокой износостойкостью и относительной дешевизной производства при хорошей обрабатываемости. Изделия из чугуна обладают хорошей способностью к поглощению вибраций, что позволяет эффективно использовать их при изготовлении элементов массивного обрабатывающего инструмента. Вместе с тем, нередко при изготовлении изделий из чугуна возникают дефекты литья, склонность к хрупкому разрушению и низким показателях пластичности, обусловленная химическим составом, структурой и наличием свободного графита.

При ремонте оборудования и устранении дефектов чугунных отливок широко применяется дуговая сварка. По свариваемости чугуны относятся к группе плохо свариваемых материалов и получение сварного соединения, близкого по своим свойствам к основному металлу, достигается только с применением специальных материалов в требуемом температурном интервале термического цикла. В современной промышленности все более широко используются чугуны с высоким содержанием таких легирующих элементов, как никель, хром и титан из-за повышенных значений вязкости и относительно низкой склонности к трещинообразованию. Авторами был подобран материал и разработана технология механизированной сварки для ремонта и восстановления массивной фрезы (рис. 1) из высоколегированного чугуна при обеспечении прочности шва, сопоставимого с основным металлом. После разделки трещины осуществлялась облицовка поверхности проволокой Панч 11 валиками минимального поперечного сечения для снижения усадочных эффектов и напряжений. Для заполнения применялась проволока Termanit X23N18, обеспечивающая повышенную пластичность шва. Это позволило существенно продлить время эксплуатации инструмента.



Рис. 1. Внешний вид фрезы, восстанавливаемой при помощи предлагаемой технологии

УДК 621.791.754

## АДДИТИВНАЯ ПОСЛОЙНАЯ НАПЛАВКА ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Н. М. ШУКАН, А. А. ЛОПАТИНА, В. П. КУЛИКОВ, А. О. КОРОТЕЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Аддитивные технологии создания изделий сложной геометрии в последнее время получают все большее распространение. Перспективным способом в случае необходимости обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик и высокой производительности является послойная дуговая наплавка (WAAM). Одним из наиболее перспективных материалов при этом является алюминиевые сплавы, широко используемые при изготовлении изделий аэрокосмического назначения.

Проводится ряд работ по созданию технологии послойной наплавки элемента двигателя, представляющего собой корпус с развитой системой внутренних каналов. При этом существует ряд вопросов, решение которых позволит эффективно использовать технологии дуговой сварки с реверсивной подачей присадочного материала. Это существенно снизит тепловложение и повысит точность обеспечения требуемой геометрии.

Аддитивная наплавка осуществлялась по предварительно рассчитанной криволинейной траектории с учетом геометрических параметров наплавляемых слоев. При этом разработанная модель учитывает не только термический цикл при последовательном наложении слоев друг на друга для равномерной наплавки, но и послойную корректировку параметров режима для обеспечения однородной и равномерной толщины наплавляемой стенки в условиях построения по вектору, заданному необходимыми численными значениями.

Это обусловлено необходимостью учета закономерности обеспечения термического цикла при различных скоростях наплавки и длине слоя за один проход. Так был наплавлен конус из сплава AlMg5 со стенкой, представляющей собой параболическую кривую с изменяемой кривизной (рис. 1). Наплавка производилась на большом диапазоне скоростей от 3 до 10 мм/с и значений силы тока от 120 до 30 А в зависимости от количества слоев.

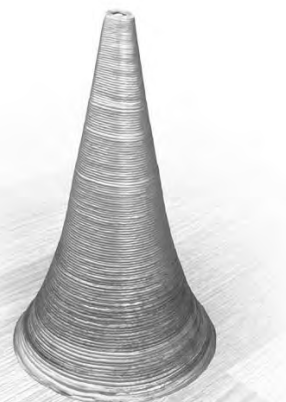


Рис. 1. Внешний корпус элемента, полученного аддитивной наплавкой

УДК 621.791.763.2

## РАЗРАБОТКА БЛОКА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМОПРИВОДОМ КОНТАКТНОЙ СВАРОЧНОЙ МАШИНЫ

Д. Н. ЮМАНОВ, С. М. ФУРМАНОВ, А. О. СЕРГЕЙЧИК

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одним из важных параметров технологического цикла контактной точечной и рельефной сварки является усилие сжатия электродов, которое существенно влияет на формируемые механические свойства сварных соединений. Работа пневмопривода контактной машины отличается значительной инерционностью, связанной с наполнением сжатым воздухом рабочей полости пневмоцилиндра и движением поршня. Эта инерционность приводит к запаздыванию приложения усилия сжатия на разных этапах протекания процесса контактной сварки, что является причиной появления дефектов и резкому снижению механических свойств сварных соединений. Поэтому существует необходимость в разработке программного управления пневмоприводом контактной сварочной машины с целью обеспечения точного и своевременного приложения усилия сжатия при предварительном сжатии и проковке.

На рис. 1 изображена электрическая схема разработанного блока программного управления пневмоприводом контактной машины с трехкамерным пневмоцилиндром для обеспечения повышенного усилия проковки.

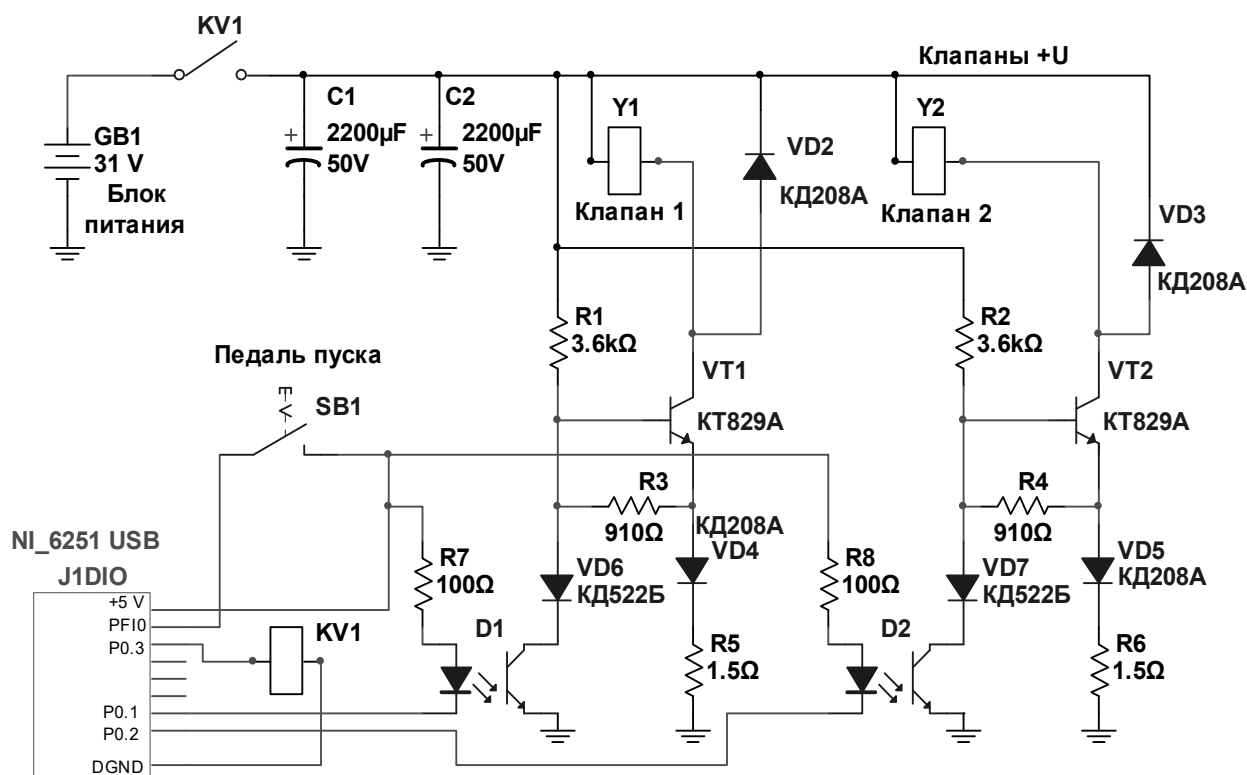


Рис. 1. Электрическая схема блока программного управления пневмоприводом контактной сварочной машины

Разработанный блок программного управления позволяет обеспечить питание катушек двух электропневмоклапанов пневмораспределителя с напряжением питания +24 В и током нагрузки 0,5 А каждого от источника питания постоянного тока GW Instek PSW7 напряжением  $U_1 = 31$  В с дискретностью установки 10 мВ.

При помощи оптронов D1 и D2 обеспечивается гальваническая развязка и защита цепей от влияния подключаемой индуктивной нагрузки в узлах включения катушек управления пневмораспределителями. К светодиодам оптронов через подтягивающие резисторы R7 и R8 подключены цифровые выходы платы сбора данных NI-USB 6251 P0.1 и P0.2 соответственно. Заземление цепи катушек реализовано при помощи подключения силовых транзисторов VT1 и VT2 к выходным цепям оптронов. При открытии силовых транзисторов VT1 и VT2 обеспечивается протекание тока питания катушек клапанов Y1 и Y2 между выводом схемы «Клапаны +U» и общим выводом через диоды VD4 и VD5 соответственно.

С целью предотвращения пробоя в случае коммутации индуктивной нагрузки диоды VD2 и VD3 пропускают ток нагрузки и тем самым защищают силовые ключи, когда происходит отключение транзисторов VT1 и VT2. Для исключения питания схемы блока программного управления при отсутствии управляющего сигнала с платы NI-USB 6251 используется реле напряжения KV1, которое подключает цепь питания только после запуска виртуального регулятора цикла в программной среде LabView, а отключает цепь перед окончанием работы программы.

Для осуществления контроля за нажатием педали запуска цикла сварки SB1 используется триггер PFI0. После нажатия педали пуска происходит запуск заданной циклограммы процесса контактной сварки с заданием мощности в каждом полупериоде протекания тока. Система управления пневмоприводом до нажатия на педаль SB1 находится в режиме ожидания.

Работа блока программного управления пневмоприводом контактной сварочной машины реализована при помощи программного кода в среде LabView, где задаются необходимые параметры включения клапанов пневмораспределителей в определенный момент времени.

Для учета инерционности пневмопривода время приложения повышенного усилия проковки отсчитывается от момента включения сварочного тока и определяется параметром «Начало ковки», что позволяет обеспечить достижение требуемого максимального усилия проковки не позднее, чем через 0,18 с после выключения тока для эффективного уменьшения растягивающих остаточных напряжений и повышения механических свойств получаемых сварных соединений.

Таким образом, разработанный блок программного управления пневмоприводом контактной сварочной машины позволяет задавать временные параметры приложения усилия сжатия с необходимой точностью и быстродействием, что положительно влияет на кинетику формирования сварного соединения и комплекса его механических характеристик.

УДК 621.762

ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА МЕТОДОМ  
ТОЧЕЧНОГО ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Д. И. ЯКУБОВИЧ, С. В. СТРЕЛЬЦОВ, А. В. ВАСЕНИЧЕВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Порошковая металлургия является одним из важнейших направлений в промышленности. Из металлических порошков изготавливают изделия различного назначения, или добавляют в качестве присадок в различные материалы. Существует множество способов получения порошковых материалов. С точки зрения получения небольших партий разнообразного по теплофизическим свойствам порошка перспективным методом является электроэрозионное диспергирование. Для его получения разработана экспериментальная установка с системой принудительного отрыва электрода от рабочей поверхности, позволяющая избежать его приваривания.

В данной установке напряжение от источника питания заряжает конденсатор, после чего он разряжается на диспергируемую поверхность с образованием мелкодисперсных капель металла. Капли при остывании превращаются в порошок. Заряд и разряд конденсатора, а также движение электрода, происходят в автоматическом режиме.

Для регулирования дисперсности порошка выбраны следующие параметры: мощность установки – 1,5 кВт, напряжение – 50...250 В, частота – 2...300 Гц, емкость – 1...10 000 мкФ. Варьирование каждого из них в данном диапазоне позволяет установить их оптимальные значения для получения частиц порошка заданного гранулометрического состава, основным из которых является дисперсность 1...50 мкм.

Для выявления работоспособности установки проводилось точечное диспергирование меди М1 и твердого сплава ВК6, для чего образцы размерами 10 × 10 мм размещались в емкости объемом 2 л. На расстоянии 0,5 мм от поверхности образца подводился подвижный вольфрамовый электрод, после чего производилась обработка в атмосфере воздуха. В результате были получены экспериментальные партии образцов порошков объемом до 0,5 см<sup>3</sup>. Полученные порошки исследовали на сканирующем электронном микроскопе. В результате установлено, что при использовании режимов 100...1000 мкФ, 50...100 В, 8...10 Гц до 60 % частиц порошка имели размеры 1...50 мкм. Из них от 10 до 50 мкм частиц порошка составили 90 %. Вместе с тем незначительная часть порошка имеет неокруглую форму, а также имеет место незначительное слипание частиц.



УДК 621.791

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ДЛЯ ШИХТЫ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Д. И. ЯКУБОВИЧ, С. В. СТРЕЛЬЦОВ, А. В. ВАСЕНИЧЕВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Получение мелкодисперсных металлических порошков является одним из перспективных направлений в металлургии. Получаемые порошки в дальнейшем можно использовать в различных областях, в том числе и в сварочном производстве в качестве добавок в покрытия электродов для дуговой сварки и наплавки.

Одним из наиболее перспективных методов получения порошковых материалов является метод электроэрозионного диспергирования, при котором образуется порошок из любого токопроводящего материала, в том числе и из тугоплавких металлов и сплавов. Он отличается относительно низкими затратами электроэнергии, экологически безопасен, а также позволяет получить порошок с частицами сферической формы. Такая форма частиц порошка позволяет как более равномерно распределять его по объему покрытия электродов для ручной дуговой сварки и наплавки, так и в перспективе использовать его для получения изделий в аддитивном производстве, где требуются порошки с размерами частиц до 50 мкм.

Для решения некоторых проблем и получения возможности быстро получать мелкодисперсный порошок округлой формы в небольших объемах из металлов различного химического состава был проведен анализ существующих методов и принято решение разработать и изготовить экспериментальную установку для точечного электроэрозионного диспергирования металлов.

В разработанной установке предусмотрена система управления, позволяющая регулировать напряжение, частоту импульсов и емкость конденсаторов. Также дополнительно предусмотрена система принудительного отрыва электрода от диспергируемой поверхности, что исключает возможность его приваривания. Изменяя эти параметры, можно контролировать размер получаемых частиц порошка и стабильность работы установки.

Для проверки работоспособности установки было проведено диспергирование твердого сплава ВК6. Полученный в ходе эксперимента порошок был исследован на микроскопе. В результате металлографических исследований полученного порошка было установлено, что более 50 % частиц порошка имеет округлую форму и размеры до 50 мкм. Данный порошковый материал можно использовать как добавку в шихту покрытых электродов для ручной дуговой наплавки.

УДК 621.791

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РАСТВОРЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПЛАВЛЕНИИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В МЕДНОЙ ИЗЛОЖНИЦЕ

Д. И. ЯКУБОВИЧ, А. В. ШАБЛОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Мелкодисперсный карбид кремния разлагается при температуре близкой к 2700 °С с активным образованием газовой фазы и последующем насыщением жидкого металла. Определение условий растворения карбида кремния в низкоуглеродистой стали при электродуговом плавлении неплавящимся электродом являлось предметом исследований.

Для определения условий проведено три вида экспериментов плавления низкоуглеродистой стали и мелкодисперсного порошка карбида кремния в медной изложнице: плавление стальной стружки, перемешанной с порошком; плавление мелких фрагментов стали размером 3 × 3 мм, выложенных по периметру изложницы с порошком в центре; плавление цельного стального прутка с порошком.

Лучшие условия растворения карбида кремния в металле оказались в последнем варианте. Для реализации данного способа был выбран прутки марки Св08 диаметром 0,3 мм и массой 15 г. Порошкообразный карбид кремния добавлялся в изложницу непосредственно перед плавкой в массе 0,3; 0,5; 0,7 и 0,9 г.

Из-за плохого растворения порошка карбида кремния, который находился на поверхности расплава, плавка осуществлялась неплавящимся электродом в среде аргона при постоянном перемешивании жидкой ванны плавящимся прутком до полного его расплавления. В связи с тем, что процесс плавки проводился вручную время плавки варьировалось от 80 до 105 с.

Из-за выдувания порошка из зоны плавления определен расход защитного газа, который не должен превышать 10 л/мин.

При последующем проведении химического анализа полученных образцов с помощью оптико-эмиссионного спектрометра SPECTROMAXx выявлена зависимость содержания углерода и кремния в металле образцов от изменения массы карбида кремния, добавляемого в процессе плавки металла. Так, среднее содержание углерода и кремния в образцах составило: при добавлении SiC 0,3 г – Si = 1,49 %, C = 0,56 %; при добавлении SiC 0,5 г – Si = 1,89 %, C = 0,61 %; при добавлении SiC 0,7 г – Si = 2,11 %, C = 0,8 %; при добавлении SiC 0,9 г – Si = 2,29 %, C = 0,81 %.

УДК 621.791

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ  
КАРБИДА КРЕМНИЯ СО СТАЛЬЮ В МЕДНОЙ ИЗЛОЖНИЦЕ

Д. И. ЯКУБОВИЧ, А. В. ШАБЛОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Введение упрочняющих фаз является предпосылкой для создания металлических материалов с требуемыми механическими свойствами. Это позволяет создавать более прочные, твердые, устойчивые к разрушению материалы, которые находят широкое применение в различных отраслях.

Традиционно добавление кремния в покрытие сварочных электродов для ручной дуговой сварки необходимо для повышения механических свойств и как раскисляющий элемент. Однако применение мелкодисперсного карбида кремния в сварочных процессах является малоизученной областью и, следовательно, требует проведения научных исследований.

Для выяснения данных параметров процесса плавления карбида кремния при помощи электродугового процесса была использована медная изложница. Она изготовлена из медного стержня длиной 125 мм и диаметром 44 мм, в торцевой части которого выполнено углубление диаметром 20 мм и глубиной 15 мм. Выбор материала обусловлен высокой теплопроводностью и теплоотдачей в окружающую среду меди, которая не успевает расплавляться и оказывать влияние на химический состав образцов.

Плавление карбида кремния со сталью осуществлялось неплавящимся вольфрамовым электродом при помощи сварочного аппарата Kemppi Minarc Tig, сила сварочного тока составляла  $I_{св} = 90$  А. Защитным газом служил аргон, расход газа составлял 10 л/мин. В качестве присадочного материала использовался сварочный пруток марки Св 08 диаметром 3 мм и массой 15 г.

Карбид кремния в виде мелкодисперсного порошка с размером частиц до 15 мкм засыпался в изложницу непосредственно перед плавлением. После чего, одновременно с плавлением металла, осуществлялось насыщение его углеродом и кремнием при перемешивании порошка с расплавом.

В результате получены восемь образцов сферической формы диаметром 19...20 мм и высотой 9...9,5 мм, масса образцов составляла 14,9...15,1 г. В некоторых случаях оставалось незначительное количество порошка в изложнице.

Установлены параметры электродугового процесса плавления карбида кремния со сталью в медной изложнице, позволяющие создать оптимальные условия для растворения SiC в металле для дальнейшего исследования химического состава и структуры полученных образцов.

УДК 621.926

## УЧЕТ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ШАРНИРЕ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ ПРИ СОУДАРЕНИИ С ЧАСТИЦЕЙ МАТЕРИАЛА

В. В. БЕРЕСНЕВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В дробилках ударного действия процесс дробления происходит при соударении дробимого материала с быстро вращающимися рабочими органами (молотками, билами), а также с ограждающими элементами машины (отбойными плитами или колосниковыми решетками).

Эти дробилки разделяются на молотковые, у которых рабочие органы (молотки) шарнирно подвешены на вращающемся с большой скоростью роторе (рис. 1, а), и роторные (рис. 1, б), у которых рабочие органы (била) жестко закреплены на вращающемся роторе.

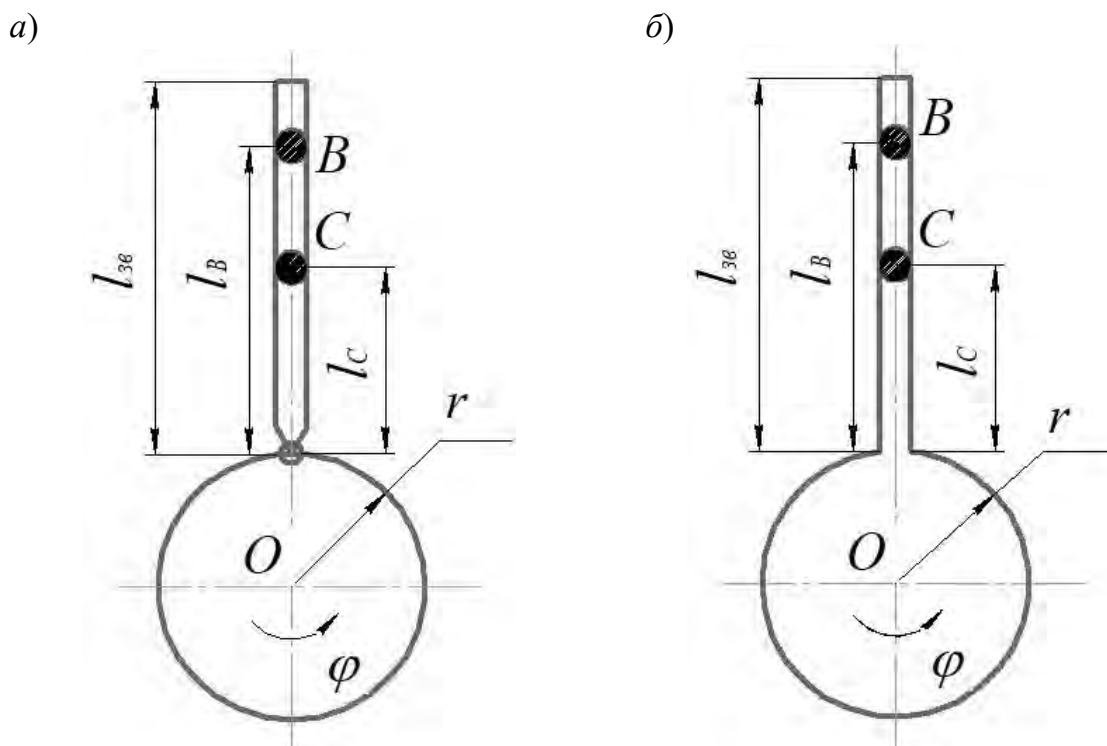


Рис. 1. Схемы дробилок ударного действия: а – молотковой; б – роторной;  $r$  – радиус ротора;  $l_c$  – расстояние до центра тяжести;  $l_B$  – расстояние до точки соударения;  $l_{зв}$  – длина звена;  $C$  – центр тяжести звена;  $B$  – точка соударения рабочего элемента с частицей материала

Условимся, что параметры ротора и рабочего элемента как для роторной, так и для молотковой дробилок равны, также равны и их угловые скорости. Соударение с частицей материала происходит на одинаковом расстоянии  $l_B$  в точке  $B$ . Параметры частицы равны в обоих случаях.

До процесса соударения при установившемся движении как рабочий элемент роторной дробилки, так и рабочий элемент молотковой дробилки совершают вращательное движение относительно точки  $O$  и кинетическая энергия их будет равна.

Одним из основных параметров, характеризующих соударение рабочего элемента роторной или молотковой дробилки с частицей материала, является ударный импульс.

Но ударный импульс в молотковой и роторной дробилке будет разный. Причем в роторной дробилке он будет больше, т. к. в ударе полностью участвует момент инерции ротора и рабочего элемента, а в молотковой в ударе большей частью участвует молоток, а момент инерции ротора передается ударному элементу через шарнир. Если в молотковой дробилке увеличить трение в шарнире или жесткость, то, соответственно, увеличится и ударный импульс.

Но классическая теория удара не учитывает действие немгновенных сил, т. к. они являются величиной малой в сравнении с ударными силами.

Если предположить, что сопротивление в шарнире меняется от нуля до бесконечности, то можно получить значение ударного импульса с учетом немгновенных сил.

Момент сопротивления немгновенных сил вращению молотка относительно шарнира и точки соударения  $B$  определяются по формуле

$$M_f = (I_p - I_m)l_B f, \quad (1)$$

где  $I_p, I_m$  – ударные импульсы роторной и молотковой дробилок соответственно при равных параметрах процесса соударения без учета влияния немгновенных сил сопротивления вращению молотка, Н·с;  $f$  – коэффициент влияния немгновенных сил сопротивления вращению молотка.

Таким образом, ударный импульс, который может развить молотковая дробилка с учетом влияния немгновенных сил сопротивления вращению молотка

$$I = I_m + \frac{M_f}{l_B}. \quad (2)$$

Подставив выражение (1) в (2), получим

$$I = I_p f + (1 - f)I_m.$$

Анализ формулы показывает, что при коэффициенте влияния немгновенных сил сопротивления вращению молотка  $f = 0$  результирующий импульс равен ударному импульсу молотковой дробилки, при  $f = 1$  – ударному импульсу роторной дробилки.

УДК 630.323

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ РАБОТЫ ПОД ПОЛОГОМ ДРЕВОСТОЯ

Э. Ф. ГЕРЦ, А. В. МЕХРЕНЦЕВ, А. Ф. УРАЗОВА

Уральский государственный лесотехнический университет  
Екатеринбург, Россия

Выполнение рубок системой машин, включающей транспортные системы (ТС), способные перемещаться в процессе выполнения работ под пологом древостоя и обеспечивающие трелевку заготовленной древесины без прокладки волоков, вызывает определенный интерес российских исследователей, однако в практике до настоящего времени практически не реализуется.

Ряд причин такого положения вещей очевиден: это востребованность таких ТС только для выполнения рубок ухода и выборочных рубок в спелых и перестойных древостоях, ограничение допустимых габаритных размеров и их маневренности в зависимости от густоты формируемого рубками древостоя, а также малая производительность в сравнении с серийными трелевочными тракторами, использующимися в традиционных технологиях.

ТС для работы под пологом древостоя должны иметь габариты и маневренность, обеспечивающие минимум повреждений деревьев, оставляемых на доращивание. Мера повреждения подроста и деревьев, оставляемых на доращивание, является одним из показателей экологичности рубок, определяемой степенью сохранности всех компонентов леса. При этом технологическое оборудование и мощность должны обеспечивать возможность работы с заготавливаемыми лесоматериалами.

Экологические требования к механизму предполагают сохранение верхних горизонтов почвы при транспортировке заготовленной древесины. Таким образом, немаловажным является выбор шасси транспортного трелевочного средства.

Существенное влияние на дополнительное уширение прохода оказывает общая компоновка ТС и механизм ее поворота. Используются гусеничные или колесные движители. Механизм поворота ТС с гусеничным движителем обеспечивает минимальный радиус поворота. В этом случае для разворота необходима круговая площадка диаметром, близким к длине машины. Однако такие повороты приводят к сдвигу и минерализации почвы, что рассматривается, как значительный экологический ущерб лесной экосистеме. Поэтому ограничимся сравнением шасси с колесным движителем и двумя вариантами поворота: шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами [1].

Для перемещения лесных длинномерных грузов в погруженном положении, наряду с расположением грузовой платформы в пределах шасси лесотранспортной машины, широко используются ТС, включающие тягач с прицепным элементом, в качестве которого могут использоваться полуприцеп, прицеп или роспуск. Выбор типа прицепного элемента для работы под пологом древостоя определяется его способностью следовать при повороте за тягачом с минимальными отклонениями.

Колесное шасси имеет, как правило, два передних поворотных колеса. При движении таких шасси по дуге радиусы поворота передних и задних колес не совпадают, прицепные элементы оказывают дополнительное влияние на ширину необходимого прохода.

Увеличение длины перемещаемого груза не только ограничивает минимально возможный радиус поворота ТС, но и требует существенно большего уширения коридора, необходимого для прохода [2–4].

Выполненные исследования позволяют заключить, что:

1) минимальный радиус поворота ТС определяется общей длиной и типом прицепного устройства. При равной длине грузовой платформы наименьший минимальный радиус поворота ТС, включающей роспуск, а наибольший – у ТС с прицепом. Увеличение минимального радиуса поворота ТС при работе с прицепом, в сравнении с полуприцепом, определяется наличием дышла и его длиной;

2) при движении ТС по радиальным кривым уширение коридора, необходимое для беспрепятственного прохода, определяется общей длиной и минимально при комплектовании тягача роспуском, колеса которого повторяют траекторию задних колес тягача. Преимущество ТС с роспуском наиболее очевидно при минимальных радиусах поворота и возрастает по мере увеличения длины грузовой платформы;

3) при равной длине грузовой платформы прицеп имеет худшие показатели маневренности в составе ТС, т. к. при равных прочих габаритах ее длина больше на длину дышла прицепа. При малой длине грузовой платформы использование прицепа при трелевке лесоматериалов под пологом древостоя наименее рационально.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Какое шасси нужно машине, работающей под пологом древостоя? / Ю. Н. Безгина [и др.] // Леса России и хозяйство в них. – 2014. – № 2 (49). – С. 30–32.
2. Трелевка древесины мини-трактором при проходных рубках в сосняках / Э. Ф. Герц [и др.] // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 113–116.
3. Рациональная технология рубок с трелевкой заготовленной древесины мини-тракторами под пологом древостоя / Э. Ф. Герц [и др.] // Изв. вузов. Сер. Лесной журнал. – 2017. – № 2 (356). – С. 119–129.
4. Герц, Э. Ф. К вопросу об организации рубок с применением бензомоторных пил и мини-тракторов / Э. Ф. Герц, Н. Н. Теринов // Изв. вузов. Сер. Лесной журнал. – 2019. – № 2 (368). – С. 86–94.

УДК 629.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ  
ГИДРОСИСТЕМЫ БС-4000ПБА-2 (ШАССИ МАЗ-5434Х3)А. А. ГРАЦ, В. Д. РОГОЖИН  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В настоящее время объемный гидравлический привод является основным типом привода специального оборудования в строительных, дорожных и других машинах. В связи с этим вопросы, связанные с повышением надежности гидроприводов машин, в частности повышения уровня технической готовности, актуальны. Известные методы поддержания работоспособного состояния, основанные на системе планово-предупредительных ремонтов, не обеспечивают в полной мере необходимый результат для систем гидроприводов и ведут к большим материальным и финансовым издержкам [1].

Практический опыт эксплуатации показал, что на работоспособность гидросистемы БС-4000ПБА-2 (шасси МАЗ-5434Х3) значительное влияние оказывают количество и качество рабочей жидкости (РЖ) [2]. Многолетний опыт эксплуатации сложных гидросистем специальных машин в организациях «Белавтодор» свидетельствует, что наиболее качественная замена РЖ происходит при ее сливе с последующей промывкой системы с использованием фильтровально-заправочного аппарата (далее – ФЗА).

Проведенные эксперименты в производственных условиях с очисткой РЖ в гидроциклонах от механических примесей (при ТО-2 и СО) показали, что отказы гидросистем уменьшились на 25 %...40 %, а повысились ресурс гидросистем (в 2–4 раза) и срок службы гидравлических масел (в 1,5–2 раза). Поэтому рационально на машинах со сложными гидросистемами устанавливать в сливных магистралях гидроциклонные аппараты перед основными сливными фильтрами. Такие технические воздействия позволяют скорректировать периодичность замены масла и фильтроэлементов, особенно в зимний период эксплуатации, т. к. из опыта эксплуатации известно, что при отрицательной температуре воздуха и скорости ветра свыше 7 м/с начинается интенсивное измельчение снега, его частички проникают через микронные зазоры в рабочую жидкость, и в результате повышается ее температура замерзания. Повышение влажности воздуха до 80 %...90 % вызывает интенсивную коррозию открытых частей гидросистем.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максименко, А. Н. Эксплуатация строительных и дорожных машин: учебное пособие / А. Н. Максименко. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.: ил.
2. Руководство по эксплуатации машины БС4000ПБА-2И 103003-0000020 РЭ. – Минск: МАЗ, 2015. – 55 с.: ил.



УДК 629.113

## РУЧНОЙ ГАЙКОВЕРТ С УСИЛИТЕЛЕМ

Р. А. ЖУРАВСКИЙ, Н. А. КОВАЛЕНКО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Основными соединениями на автомобиле являются резьбовые. Их ослабление приводит к фреттинг-изнашиванию, разгерметизации корпусных деталей, потере управляемости автомобиля. Поэтому при проведении технических обслуживаний (ТО) большое внимание уделяется контролю их состояния путем проведения крепежных работ, объем которых составляет примерно 20 % от общей трудоемкости ТО. При проведении разборочно-сборочных работ (замена или ремонт агрегатов) трудозатраты на отворачивание и заворачивание резьбовых элементов могут составлять до 80 %...90 % от общей трудоемкости ремонта. Кроме того, отворачивание и заворачивание резьбовых элементов средних и больших диаметров требуют значительных усилий.

Для повышения производительности работ и облегчения труда используются различные виды гаражных гайковертов. К сожалению, они имеют значительную стоимость и длительные сроки окупаемости, особенно в небольших автотранспортных организациях. Одним из решений является использование ручных гайковертов, которые имеют небольшую массу и не привязаны к какому-либо источнику питания.

Разработанный авторами гайковерт представляет собой цилиндр с понижающим планетарным редуктором, передаточное отношение которого составляет 5. Для анализа его кинематических и конструктивных особенностей была изготовлена модель на 3D-принтере (рис. 1).

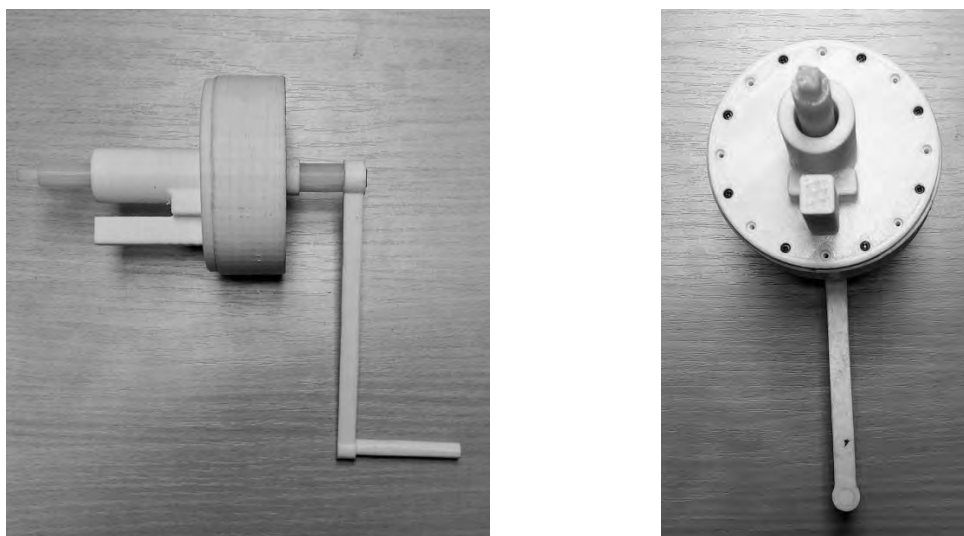


Рис. 1. Общий вид 3D-модели гайковерта с усилителем

Проведенные исследования показали, что гайковерт способен развивать момент до 300...400 Н·м при моменте на рукоятке гайковерта 60...80 Н·м.

УДК 621.926

## ВИБРАЦИОННАЯ МЕЛЬНИЦА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Е. В. ЗАРОВЧАТСКАЯ<sup>1</sup>, Л. А. СИВАЧЕНКО<sup>1</sup>, Т. М. БУЗАУОВА<sup>2</sup><sup>1</sup> Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь<sup>2</sup> Карагандинский технический университет  
имени Абылкаса Сагинова  
Караганда, Казахстан

Проблема тонкого помола минеральных материалов имеет важное значение для многих отраслей промышленности. Для этих целей широко применяются различные по своей конструкции и принципу действия мельницы: шаровые, планетарные, бисерные, пружинные, струйные, дезинтеграторы и др. [1]. Одним из перспективных направлений получения тонкодисперсных порошков является вибрационный способ помола, осуществляемый в вибрационных мельницах [1, 2]. Однако их существующие конструкции отличаются высокой энергоемкостью, большой металлоемкостью и сложностью организации рабочего процесса в открытом цикле. Для устранения указанных недостатков предложена новая научная концепция управляемого движения обрабатываемой среды и разработана конструкция вибрационной балансирной мельницы непрерывного действия, схема которой приведена на рис. 1.

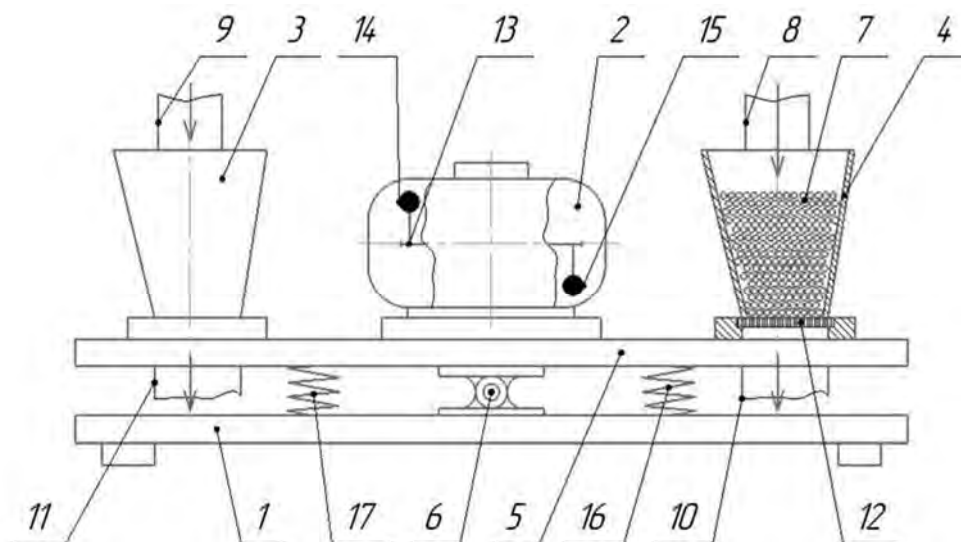


Рис. 1. Конструкция вибрационной балансирной мельницы

Мельница содержит раму 1, генератор колебаний 2, помольные камеры 3, 4, смонтированные на коромысле 5, установленном на оси 6. Каждая из помольных камер имеет мелющую шаровую загрузку 7, патрубки для загрузки материала 8, 9 и для выгрузки материала 10, 11, причем у основания помольных камер установлены решетки 12. Генератор колебаний содержит ротор 13,

на котором противофазно смонтированы дебалансы 14, 15. Для динамического уравновешивания конструкции предусмотрены пружины 16, 17.

Рабочий процесс вибрационной балансирной мельницы осуществляется следующим образом. Включается генератор колебаний 2, который с помощью установленных противофазно на роторе 13 дебалансов 14, 15 создает инерционную пару сил, которая приводит в колебательное движение коромысло 5 с помольными камерами 3, 4. Коромысло 5 сообщает высокочастотные противофазные колебания помольным камерам с мелющей загрузкой 7. Далее через загрузочные патрубки 8, 9 в помольные камеры в равном количестве подаются подлежащие обработке исходные компоненты, которые, просыпаясь между вибрирующими соударяющимися мелющими телами, подвергаются разрушению и под действием сил тяжести поступают в ее нижнюю часть, постепенно уменьшаясь в размерах. Измельченный до требуемой степени продукт проходит через решетки 12 и посредством патрубков 10, 11 отводится как готовый продукт. В процессе работы пружины 16, 17 выполняют функции амортизаторов и стабилизаторов положения коромысла 5. Управление интенсивностью и степенью помола материала можно осуществлять путем изменения состава мелющей загрузки и геометрическими параметрами помольных камер, частотой вращения ротора 13 генератора колебаний, а также расстоянием центров тяжести помольных камер от оси б установки коромысла 5.

Практическая реализация данной вибрационной мельницы основана на использовании серийно выпускаемых электрических инерционных вибраторах с противофазно установленными дебалансами. При этом организована двухпоточная схема помола, что увеличивает производительность мельницы, а противоположные векторы колебаний помольных камер обеспечивают снижение потребляемой мощности и способствуют замыканию инертных сил на шарнирные звенья конструкции. Все вышесказанное позволяет рассматривать разработанную мельницу как перспективную для использования в различных технологических процессах.

Технологические испытания, выполненные на экспериментальной установке вибрационной балансирной мельницы непрерывного действия, показали ее высокую эффективность и способность производить помол материалов с большей крупностью частиц исходного материала, чем в аппаратах аналогичного назначения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиваченко, Л. А. Вибрационная балансирная мельница / Л. А. Сиваченко, Е. В. Заровчатская // Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии : сб. докл. IV Нац. конф. – Белгород: Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова, 2023. – 154 с.
2. Сиваченко, Л. А. Технический уровень аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола материалов и пути их развития / Л. А. Сиваченко, Е. В. Заровчатская, И. М. Дыдышко // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 57–71.

УДК 629.113.004

## МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОЙКИ АВТОМОБИЛЕЙ

Н. А. КОВАЛЕНКО, Е. П. КЛЕПЧА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В настоящее время существует много совершенно разных по своим показателям, характеристикам и условиям работы моечных установок. Активно идет процесс развития и внедрения новых способов мойки автомобиля с применением современного оборудования. Поэтому при создании постов для проведения уборочно-моечных работ (УМР) необходимо определить, при использовании каких моечных установок автотранспортная организация (АТО) получит наибольший эффект. При этом следует учитывать все технико-экономические показатели.

Авторами сформирована методика комплексной оценки эффективности работы моечных установок. В качестве критерия предлагается комплексный показатель стоимости, который должен стремиться к минимуму, при условии, что АТО затратит как можно меньше средств на мойку и получит эффективный результат.

Комплексный показатель стоимости для  $i$ -й модели моечной установки предлагается определять по формуле

$$C_{Ki} = S_{Ki} \cdot x_n \cdot k_{\text{ЭФ}i},$$

где  $S_{Ki}$  – стоимость мойки одного автомобиля при использовании  $i$ -й модели моечной установки;  $x_n$  – количество постов для проведения УМР в АТО;  $k_{\text{ЭФ}i}$  – коэффициент эффективности работы мойки  $i$ -й модели.

Стоимость мойки одного автомобиля для моечных установок  $i$ -й модели будет отличаться и может быть определена как сумма эксплуатационных затрат и капитальных вложений:

$$S_{Oi} = \frac{1}{N_{\text{УМР}}} (C_{\text{Э}ki} + E_n \cdot K_{\text{в}i}),$$

где  $N_{\text{УМР}}$  – годовая программа УМР для АТО;  $C_{\text{Э}ki}$  – годовые эксплуатационные затраты на содержание  $i$ -й модели моечной установки;  $E_n$  – нормативный коэффициент приведения капитальных вложений к одному году,  $E_n = 0,13 \dots 0,15$ ;

$K_{vi}$  – капитальные вложения на приобретение  $i$ -й модели моечной установки.

Годовая программа УМР определяется на основе технологического расчета автотранспортной организации. Приближенно ее можно рассчитать по формуле

$$N_{УМР} = \frac{L_{ГП}}{l_{УМР}},$$

где  $L_{ГП}$  – годовой пробег парка автомобилей, эксплуатируемых в АТО;  $l_{УМР}$  – периодичность выполнения уборочно-моечных работ (принимается 800...1000 км).

Эксплуатационные затраты определяются по укрупненным нормативам, учитывающим затраты на заработную плату рабочих-мойщиков, на содержание рабочих мест или постов при использовании  $i$ -й моечной установки. Затраты на содержание включают амортизационные отчисления на ремонт и замену  $i$ -й модели мойки и эксплуатационные затраты на электроэнергию, воду, тепло, сжатый воздух и др.

Капитальные затраты определяются суммой стоимостей приобретения и монтажа  $i$ -й модели мойки, а также стоимостью строительства производственной площади для ее размещения (для вновь создаваемых АТО).

Число постов  $x_n$  определяется с учетом годовой программы УМР и пропускной способности моечной установки.

Коэффициент эффективности определяется по формуле

$$k_{\text{эф}i} = \frac{t_i}{t_{\text{эм}}},$$

где  $t_i$  – трудоемкость мойки одного автомобиля при использовании  $i$ -й модели моечной установки;  $t_{\text{эм}}$  – эталонная трудоемкость мойки автомобиля (принимается 0,1 чел.-ч при механизированной мойке и 0,5 чел.-ч при ручной).

При использовании данной методики сначала подбирают несколько подходящих моделей моечных установок (с учетом типов подвижного состава, его разномарочности в АТО и т. д.). Далее определяют для каждой  $i$ -й модели мойки коэффициент эффективности, количество постов для проведения УМР, стоимость мойки одного автомобиля при использовании  $i$ -й модели моечной установки и рассчитывают комплексный показатель стоимости для каждой модели. Наименьшее его значение будет соответствовать наилучшей моечной установке.

УДК 629.083

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ТИПОВ РАБОЧИХ ПОСТОВ В АВТОТРАНСПОРТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Н. А. КОВАЛЕНКО, В. П. ПАВЛЕНКОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Большинство технологических процессов технического обслуживания (ТО) и ремонта выполняется непосредственно на автомобиле – свыше 50 % общей трудоемкости работ. Их выполнение требует создания и использования разнообразных рабочих постов, которые классифицируют в зависимости от конструкции и технологической оснащённости, технологических возможностей, способа установки транспортных средств, взаимного расположения постов.

Понятно, что для АТО является важным правильным выбором типа постов для каждой производственной зоны, который обеспечивал бы выполнение программы работ по ТО или ремонту при рациональном использовании материальных, трудовых и финансовых затрат.

Практика использования постов показывает, что на выбор их типа влияет достаточно большое количество факторов, но к наиболее значимым относятся: вид технологического процесса (ЕО, Д-1, Д-2, ТО-1, ТО-2, ТР); тип подвижного состава и количество этих типов в автотранспортной организации (АТО); обслуживаются и ремонтируются одиночные автомобили или автопоезда; количество постов, необходимых для выполнения производственной программы определенного вида ТО или ремонта.

Авторами на основе системного анализа разработан алгоритм выбора типа постов для конкретной АТО. На первом этапе задается вид технологического процесса и формируется на основании классификационной схемы постов по возможности наиболее широкий перечень их видов при условии, что на них можно выполнять эти процессы.

На втором этапе задается тип или число типов автомобилей, эксплуатируемых в АТО и, с учетом этого, корректируется перечень видов постов первого этапа (как правило, в сторону уменьшения).

На третьем этапе анализируется возможность их использования в зависимости от того одиночные в АТО автомобили или автопоезда. Перечень видов постов снова корректируется (уменьшается).

Оставшийся перечень вариантов постов снова (четвертый этап) корректируется в зависимости от числа постов в рассматриваемой производственной зоне. После этого, как правило, на выходе остается один или два варианта типов постов. Если останется два и более вариантов, то проводят технико-экономическую оценку их эффективности и на основании этого делают окончательный выбор типа поста.

УДК 621.43

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ДВС

Е. В. КУЗНЕЦОВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Как известно, любое техническое решение имеет достоинства и недостатки. Например, в качестве коренных и шатунных подшипников коленчатых валов четырёхтактных моторов, как правило, применяют подшипники скольжения (вкладыши). Главное их достоинство – компактность, но к недостаткам можно отнести, во-первых, необходимость смазки под давлением, что влечет усложнение конструкции двигателя, во-вторых, нестабильность коэффициента трения, который изменяется в широком диапазоне – от 0,01 до 0,15. Подшипники же качения (шариковые или роликовые) при жидкой смазке имеют постоянный коэффициент трения, равный 0,01.

С помощью математической модели двигателя [1] рассмотрено влияние типа подшипников кривошипно-шатунного механизма четырёхтактного дизеля на его основные показатели.

В указанной модели учитывается трение в парах: «поршень – цилиндр», «поршневой палец – верхняя головка шатуна», «нижняя головка шатуна – шатунная шейка коленчатого вала» и «коренные шейки коленчатого вала – картер». Сила трения поршня о стенку цилиндра направлена вдоль его оси и оценивается по зависимости

$$F_{\text{тр.п}} = - \text{sign}(v_{\text{п}}) f_{\text{п}} (F_N + F_{N\text{ст}}), \quad (1)$$

где  $\text{sign}(v_{\text{п}})$  – функция знака скорости поршня;  $f_{\text{п}}$  – коэффициент трения поршня о стенку цилиндра;  $F_N$  – боковая сила, прижимающая поршень к цилиндру;  $F_{N\text{ст}}$  – статическая сила прижатия поршневых колец к цилиндру.

Аналогично оцениваются остальные указанные силы трения. Направлены они перпендикулярно действующим в парах трения силам давления против векторов относительных скоростей движения.

Коэффициент  $f$  в каждой паре трения скольжения является переменной величиной и изменяется в указанных широких пределах. Текущее значение его определяется с помощью кривой Герси – Штрибека по критерию Зоммерфельда:

$$Z = \frac{\mu v A}{F}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости смазки в подшипнике;  $v$  – скорость скольжения одной детали относительно другой;  $A$  – площадь пары трения;  $F$  – сила, прижимающая одну деталь к другой.

На примере дизеля ЯМЗ-240, параметры которого использованы в модели, получен график изменения коэффициента трения в паре «поршень – цилиндр» от угла поворота коленчатого вала  $\varphi$  за один цикл работы мотора на номинальном режиме (рис. 1). Аналогичный характер изменения коэффициента трения в других парах скольжения.

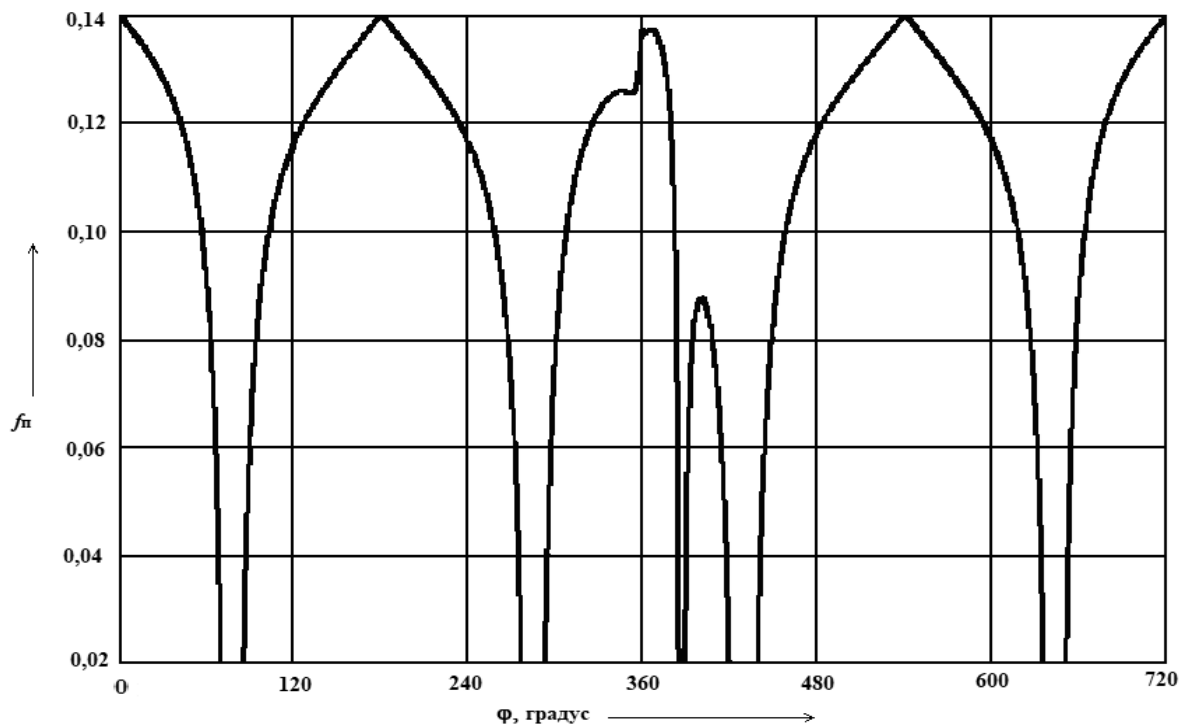


Рис. 1. Изменение коэффициента трения в паре «поршень – цилиндр» ЯМЗ-240

Наибольшее трение имеет место в шатунной шейке и в поршневом пальце. Их суммарная сила составляет более 7,5 кН.

Данный двигатель, как известно, в качестве коренных опор имеет роликовые подшипники качения. Его КПД на указанном режиме составляет 35 %, а мощность 357 л. с. Если бы коренные опоры были подшипниками скольжения, то КПД составлял 33 %, а номинальная мощность 343 л. с. А если бы и шатунные подшипники были подшипниками качения, то КПД составил 36 %, а мощность 370 л. с, т. е. применение подшипников качения на коленчатом валу позволяет почти на 8 % увеличить номинальную мощность мотора и на 3 % КПД.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузнецов, Е. В.** Основы теории и проектирования ДВС / Е. В. Кузнецов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 323 с.



УДК 629.926

## ЦЕПНОЙ АГРЕГАТ ДЛЯ СОРТИРОВКИ МАТЕРИАЛОВ

М. С. КУЗЬМЕНКОВА<sup>1</sup>, Л. А. СИВАЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Барановичский государственный университет

Барановичи, Беларусь

<sup>2</sup> Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Предложен цепной агрегат для сортировки материалов, привод которой осуществляется посредством кривошипно-шатунного механизма и характеризуется очевидной конструктивной простотой и широкими функциональными возможностями.

Цепной агрегат для сортировки материалов содержит раму 1 с установленным на ней приводом 2, просеивающую поверхность, выполненную в виде дугообразного цепного полотна 3, в своей нижней части снабжено неподвижно закрепленной на нем толкающей планкой 4 для передачи ему возвратно-поступательных движений посредством кривошипно-шатунного механизма 5 относительно точек закрепления его цепных элементов на стенках камеры, один из концов которой шарнирно связан с приводом 3 таким образом, что ось шатуна совпадает с ее продольной осью. Подача исходного материала осуществляется через загрузочный бункер 6, а выгрузка подрешетных фракционированных продуктов посредством бункера 7, выгрузка надрешетного продукта производится при помощи лотка 8. Конструктивная схема цепного агрегата для сортировки материалов представлена на рис. 1.

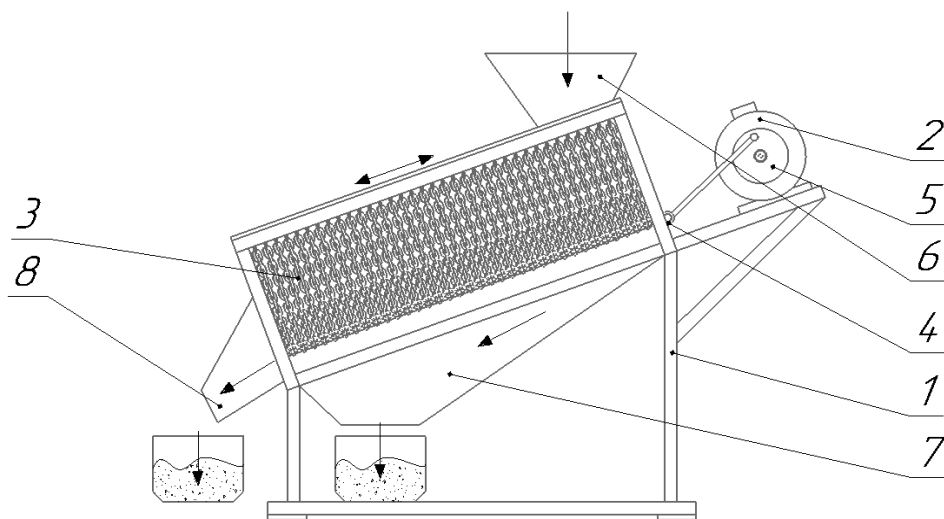


Рис. 1. Конструктивная схема цепного агрегата для сортировки материалов

Рабочий процесс сортировки материалов в цепном агрегате разработанной конструкции характеризуется высокой технологической эффективностью и имеет ряд факторов, позволяющих управлять его работой, а конструкция отличается простотой и удобством в эксплуатации.

УДК 629.114.2:621.828.6

## К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПАССИВНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА НА ПОДПОРНУЮ СТЕНКУ

А. В. КУЛАБУХОВ, А. П. СМОЛЯР  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Расчет пассивного давления грунта на подпорную стенку, как правило, сводится к расчету предельной величины этого давления при известной величине угла его наклона относительно нормали к подпорной стенке. Принято считать, что величина этого угла равна углу внешнего трения грунта о материал подпорной стенки. В действительности этот угол зависит от абсолютной величины приведенного давления, которое в свою очередь определяется величиной действительного давления и давлением связности грунта.

При этом возникает вопрос, как определить величину пассивного приведенного давления грунта на подпорную стенку, если оно, в свою очередь, зависит от величины угла отклонения действительного давления от нормали к подпорной стенке и абсолютной величины этого давления, но в то же время и определяет их.

Очевидно, что решение этого вопроса существует. Однако найти на него ответ аналитическими методами в замкнутой форме не представляется возможным. Для поиска можно использовать метод последовательного приближения. Поскольку расчеты с использованием таких методов трудоемки и громоздки, то будем использовать ЭВМ.

В алгоритме разработанной программы расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку за основу взят метод последовательного приближения. При работе данной программы первоначально значению переменной величины пассивного приведенного давления грунта на подпорную стенку присваивается величина давления связности грунта. Тем самым величина действительного давления грунта на подпорную стенку и угол его отклонения приравняются к нулю. Затем, изменяя величину действительного давления, на приращение, равное изменению действительного давления за один шаг цикла программы, одновременно изменяется и угол его отклонения. При полученных значениях величин действительного давления и угла его отклонения рассчитываем значение величины приведенного давления грунта на подпорную стенку. В свою очередь, величина приведенного давления может и не совпасть с его предыдущим значением. Расчет продолжается до тех пор, пока отличия между последующим и предыдущим значениями приведенных давлений грунта на подпорную стенку не будут меньше погрешности расчета, заданной изначально.

УДК 621.878.2

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИНА. В. КУЛАБУХОВ, А. П. СМОЛЯР  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В связи с постоянным увеличением объема земляных работ задача снижения энергоемкости разработки грунта остается актуальной. Экспериментальные исследования натуральных образцов занимают много времени и требуют значительных ресурсных затрат, что затрудняет оперативную реакцию на изменения в потребностях рынка строительной техники. Поэтому акцент делается на использовании аналитических методов расчета сопротивления грунтов резанию с привлечением современных вычислительных ресурсов [1]. Анализируя рабочие органы землеройных машин, предназначенных для рытья траншей (к таким рабочим органам относятся баровые цепи, фрезы, машины со шнековым рабочим органом и другие), можно выделить некоторые закономерности конструкции используемых на них режущих элементов. Так, режущие элементы внедряются в грунт под некоторым углом поворота в плане и под наклоном в горизонтальной плоскости. Также режущие элементы один относительно другого обычно располагаются с траекторным смещением. Все эти приемы выполнены для снижения сопротивления резанию. Пространственное расположение режущих элементов продиктовано в большей степени «интуитивным» представлением о снижении энергоемкости резания, и, несомненно, приводит к ее снижению, однако резерв снижения энергоемкости резания использован не в полном объеме. Имея возможность анализировать энергоемкость резания аналитически, становится возможным выбрать данный резерв в полной мере [2]. Разработка аналитической идентификационной модели открывает возможность анализировать влияние всех параметров на сопротивление грунтов резанию, при этом становится возможным проводить анализ влияния как каждого параметра в отдельности, так их сочетания с учетом взаимного влияния друг на друга. Выполнение расчетов с достаточно небольшим шагом позволит также выявлять бифуркационные скачки и использовать это явление в целях оптимизации параметров режущих элементов.

Таким образом, использование аналитических методов расчета сопротивления грунтов резанию с привлечением современных вычислительных ресурсов позволяет эффективно снизить энергоемкость разработки грунта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию : монография / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 179 с.
2. Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом : монография / Е. И. Берестов [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 184 с. : ил.

УДК 621.926

## К ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОЛОТКОВЫХ ДРОБИЛОК ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. В. КУРОЧКИН

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Измельчители ударного действия широко применяются в технологических комплексах по производству строительных материалов, в дробильно-сортировочных установках, в сельском хозяйстве, а также на предприятиях по переработке твердых коммунальных отходов [1].

Применение конструкций ударного способа измельчения характеризуется высокой степенью измельчения и относительно низкой энергоэффективностью. Среди недостатков в конструкциях измельчителей ударного действия стоит отметить повышенный износ ударных элементов, особенно в случаях измельчения абразивных материалов, таких как кварцевый песок, цементный клинкер, гранитная крошка и т. п. [2].

Так, например, в ЗАО «Могилевский КСИ», при измельчении кварцевого песка для приготовления формовочной смеси силикатного кирпича молотковой дробилкой, износ ударных элементов до полной замены происходит за 4–6 смен, причем интенсивность износа корпуса значительно ниже.

Производственный опыт показал, что износ била по всей площади происходит неравномерно, наиболее интенсивно истирание била реализуется в местах непосредственного контакта с обрабатываемым материалом (рис. 1).



Рис. 1. Износ рабочего элемента

С целью снижения интенсивности износа рабочих элементов молотковой дробилки при измельчении абразивных материалов возможно изготавливать

ударные элементы из высокопрочных материалов, но это приведет к значительному повышению себестоимости установки. Поэтому предлагается конструкция ударного элемента (рис. 2), имеющая износостойкие вставки в местах непосредственного контакта била с материалом [3].

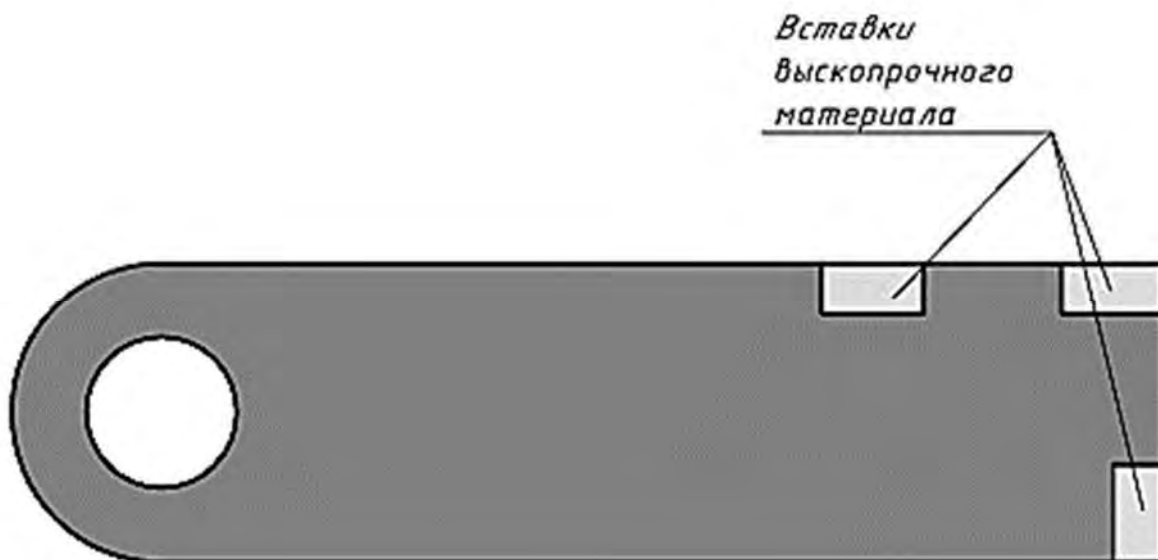


Рис. 2. Рабочий элемент с высокопрочными вставками

Предлагаемая конструкция ударных элементов позволяет значительно повысить ресурс молотковой дробилки до полного износа для реализации процессов измельчения абразивных материалов при незначительном повышении затрат на изготовление.

Причем дальнейшее снижение себестоимости изготовления предлагаемой конструкции возможно осуществить за счет изготовления высокопрочных вставок из отработанных твердосплавных токарных резцов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиваченко, Л. А. Интенсификация процессов ударной дезинтеграции на основе управляемого движения измельчаемых материалов / Л. А. Сиваченко, Н. В. Курочкин, Т. Л. Сиваченко // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 3. – С. 73–82.
2. Сиваченко, Л. А. Интенсификация процессов ударной дезинтеграции на основе управляемого движения измельчаемых материалов / Л. А. Сиваченко, Н. В. Курочкин, Т. Л. Сиваченко // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 57–64.
3. Сиваченко, Л. А. Пути совершенствования ударных элементов молотковых дробилок / Л. А. Сиваченко, Н. В. Курочкин // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях – 2023: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 240–243.

УДК 62.114

## ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК В ГУСЕНИЧНОМ ДВИЖИТЕЛЕ БУЛЬДОЗЕРОВ

И. В. ЛЕСКОВЕЦ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

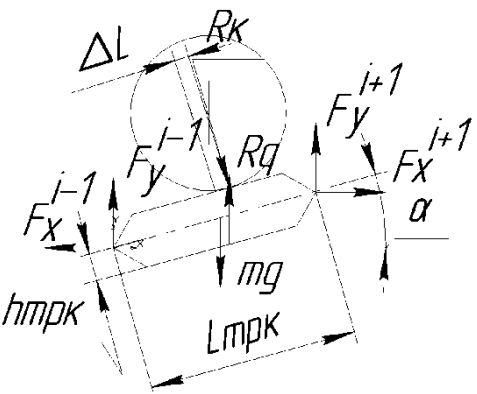
Машины для земляных работ развиваются динамично и интенсивно. Особый прогресс заметен в развитии рабочего оборудования. За последние годы появилось новое рабочее оборудование экскаваторов и погрузчиков, в частности челюстные ковши, специальные устройства, предназначенные для разрушения и погрузки грузов. Тем не менее, наиболее распространёнными машинами для земляных работ являются бульдозеры. Они применяются для строительства насыпей, выемок и других элементов земляных конструкций. Широкое распространение бульдозеров обусловлено простотой конструкции рабочего оборудования. Отвальный тип рабочего оборудования обеспечивает достаточно высокую эффективность при разработке грунта. При работе на тяжёлых грунтах, а также на грунтах с низкой несущей способностью, наиболее широко используются гусеничные бульдозеры. Гусеничный движитель, благодаря своим преимуществам, находит широчайшее применение в машинах, которые используются при строительстве различных сооружений, разработке карьеров, вскрышных работах и при добыче полезных ископаемых. Одним из последних достижений в области развития гусеничных движителей является использование резиновых и резиновых гусениц. Однако эти решения используются на достаточно лёгких машинах. В связи с тем, что значительные массовые нагрузки оказывают большое влияние на взаимодействующие поверхности гусеничного движителя, возникают существенные силы трения, что приводит к ускоренному износу резиновых конструкций. Наиболее широкое распространение имеют металлические гусеничные движители, которые используются практически на всех машинах от легких до тяжёлых и особо тяжёлых классов, несмотря на их недостатки. Особенности конструкций гусеничных движителей приводят к тому, что одним из основных их недостатков является большая масса и повышенный износ, по сравнению с другими конструктивными элементами бульдозера, особенно при работе на высокоабразивных грунтах. Эти недостатки приводят к частой замене гусеничных двигателей и их частей, что значительно увеличивает эксплуатационные затраты. Совершенствование гусеничных движителей является одной из важных задач и новые конструктивные решения могут значительно снизить эксплуатационные затраты и повысить эффективность работы бульдозеров.

Исследованию нагрузок, возникающих в гусеничных движителях, посвящено достаточно много работы современных авторов. Примерами исследования работы гусеничных движителей могут служить работы [1–3]. Одной из основных особенностей моделирования процессов, происходящих в гусеничном движителе, является то, что все авторы рассматривают гусеничную ленту в целом. Это

не позволяет проанализировать процессы, происходящие с каждым трактом в отдельности.

Автором предлагается рассматривать каждый трак в зависимости от его положения на гусеничном двигателе. Анализируя конструкции гусеничных движителей: (быстроходного и тихоходного, многоопорного и малоопорного), для всех вариантов можно выделить следующие положения трактов: на ведущем колесе, на тяговой ветви, под опорным катком, между опорными катками, на направляющей ветви, на направляющем колесе, между поддерживающими катками, на поддерживающем катке. В зависимости от расположения трака его поведение будет определяться своими динамическими и математическими моделями. Для трака, расположенного под опорным колесом, динамическая и математическая модели представлены в табл. 1.

Табл. 1. Динамическая и математическая модели трактов

Динамическая модель трака	Математическая модель трака
	$\frac{dv_{mpk}^x}{dt} = (F_x^{i+1} - F_x^{i-1}) / m_{mpk}$ $\frac{d v_{mpk}^y}{dt} = (F_y^{i+1} + F_y^{i-1} - m_{mpk} g + R_q - R_k \cos(\alpha)) / m_{mpk}$ $\frac{d\omega_{mpk}}{dt} = (F_y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) \frac{L_{mpk}}{2} - F_y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \frac{L_{mpk}}{2} - F_x^{i+1} \cdot \cos(\alpha) \frac{h_{mpk}}{2} + F_x^{i-1} \cdot \cos(\alpha) \frac{h_{mpk}}{2} - R_k \cdot L) / J_{mpk}$

Предлагаемый подход позволит определить силы, ускорения, скорости и перемещения трактов гусеничного обвода по время движения машины.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абызов, А. А.** Моделирование динамики промышленного трактора при низкочастотном вибровозбуждении со стороны гусеничного движителя / А. А. Абызов, К. Д. Мухиддинзода, С. Г. Некрасов // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 63–72.
2. Динамика процессов взаимодействия элементов гусеничного движителя при наезде первого опорного катка на неровность / И. А. Тараторкин [и др.] // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 27–38.
3. **Гончаров, К. А.** Моделирование распределения усилий в тяговых контурах гусеничных движителей в условиях переменности сопротивления движению грунтов / К. А. Гончаров // Науч.-техн. вестн. Брян. гос. ун-та. – 2023. – № 2. – С. 127–133.

УДК 629.113

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЖИМНОГО УСТРОЙСТВА БАРАБАННОГО ТОРМОЗНОГО МЕХАНИЗМА

В. П. ЛОБАХ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Один из путей решения проблемы безопасности движения на автомобильном транспорте – совершенствование тормозной системы как основного элемента активной безопасности движения, в том числе и тормозного механизма (ТМ), эффективность которого закладывается на стадии конструирования. При этом важным является его высокая эффективность и надежность при малых размерах и массе.

В настоящее время разработано и используется на практике большое количество конструкций и методов расчета ТМ. Автором разработан метод, позволяющий определить значения разжимающих колодки сил барабанного ТМ, получены формулы для определения этих сил, а также для определения момента трения ТМ, и даны практические рекомендации по повышению эффективности ТМ.

Для ТМ с кулачковым разжимным устройством при расчетах возникает проблема с определением разжимающих колодки сил  $Q_1$  и  $Q_2$ , метод определения которых предлагается.

Для исследований использовалась схема ТМ (рис. 1).

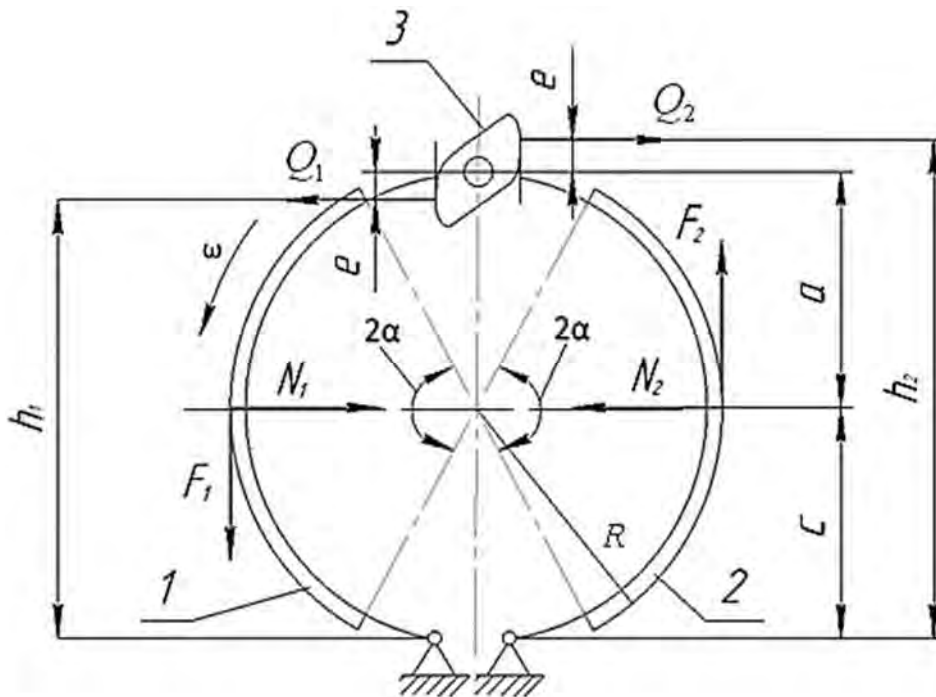


Рис. 1. Схема ТМ к определению разжимающих колодки сил: 1 – первичная (заклиниваемая) колодка; 2 – вторичная (расклиниваемая) колодка; 3 – разжимной кулак



У ТМ с кулачковым разжимным устройством разжимающие колодки силы не равны, т. е.  $Q_1 \neq Q_2$ , а тормозные моменты, развиваемые первичной и вторичной колодками, равны, т. е.  $M_1 = M_2$ .

Однако метод определения этих сил до сих пор не разработан, а потребность в нем существует. Например, для расчета колодок на прочность необходимо знать значения разжимающих колодки сил, и если они разные, то расчет колодок необходимо выполнять индивидуально, что возможно потребует изменения конструкции колодок.

$$Q_1 = \frac{T \cdot i \cdot \eta}{1 + k_1 / k_2}; \quad (1)$$

$$Q_2 = T \cdot i \cdot \eta - Q_1; \quad (2)$$

$$k_1 = (a + c - e) / (a - \mu \cdot R); \quad (3)$$

$$k_2 = (a + c + e) / (a + \mu \cdot R); \quad (4)$$

$$M = 2 \cdot Q_1 \cdot k_1 \cdot \mu \cdot R, \quad (5)$$

где  $T$  – сила, подводимая к рычагу кулачкового разжимного устройства со стороны привода;  $i, \eta$  – передаточное отношение и КПД разжимного устройства;  $a, c, e$  – геометрические размеры тормоза (см. рис. 1);  $R$  – радиус тормозного барабана;  $\mu$  – коэффициент трения между фрикционной накладкой и барабаном;  $k_1, k_2$  – постоянные тормоза, зависящие от его геометрических размеров;  $M$  – момент трения тормоза.

Выполненные расчеты по формулам (1)–(5) показали, что разжимающие колодки силы не равны и отличаются более чем в 2 раза, что необходимо учитывать при расчете колодок, барабана и кулачкового разжимного устройства.

Результаты выполненных исследований следующие.

1. Получены выражения для определения разжимающих колодки сил у барабанного ТМ с кулачковым разжимным устройством.

2. Получены новые выражения для определения момента трения барабанного тормозного механизма с кулачковым разжимным устройством.

3. Установлено, что на вторичную колодку со стороны разжимного кулака действует более чем в 2 раза большая сила в сравнении с силой, действующей на первичную колодку.

4. Установлено, что в случае различных направлений поворота разжимного кулака и вращения барабана момент трения больше, чем в случае их совпадения примерно на 5 %.

УДК 62-592.117

## ВЛИЯНИЕ УПРУГОСТИ ТОРМОЗНОГО ДИСКА НА УСИЛИЕ НА ТОРМОЗНОМ ЦИЛИНДРЕ

А. А. МЕЛЬНИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

При исследовании величины усилия на тормозном цилиндре гидравлической фрикционной тормозной системы установлено, что непосредственное влияние на него оказывает упругость тормозного диска и сжимаемость жидкости. Сжимаемость рабочего тела, хотя и не велика при использовании гидравлического привода, по сравнению с пневматическим, ее влияние на работу тормозных механизмов слабо исследовано. При этом известные формулы для определения усилия на цилиндре не учитывают сжимаемость тормозной жидкости [1].

Для отображения влияния сжимаемости рабочего тела предлагается ввести коэффициент  $K_{ж}$ , зависящий от модуля объемной упругости жидкости  $E = Vdp / dV$ , где  $V$  – объем жидкости. При этом для идеальной несжимаемой жидкости коэффициент  $K_{ж} = 1$ . При возникновении в приводе тормоза газожидкостной смеси коэффициент, учитывающий сжимаемость рабочего тела, может достигать 0,85.

Учитывая упругость тормозного диска и сжимаемость тормозной жидкости, усилие на тормозном цилиндре  $F_{ц}$ , Н, будет определяться по формуле

$$F_{ц} = m_{ц} \frac{d^2 X_{ц}}{dt^2} + B \frac{dX_{ц}}{dt} + K_{ж} (K_{д} + K_{п}) X_{ц},$$

где  $m_{ц}$  – масса поршня, кг;  $X_{ц}$  – объем, вытесняемый поршнем, м<sup>3</sup>;  $B$  – коэффициент, характеризующий инертность поршня;  $K_{д}$  – упругая жесткость тормозного диска, Н/м;  $K_{п}$  – упругая жесткость возвратной пружины, Н/м;  $K_{ж}$  – коэффициент, учитывающий сжимаемость жидкости.

Предложенное аналитическое выражение, учитывающее сжимаемость тормозной жидкости, позволит исследовать влияние свойств рабочего тела на развиваемую мощность тормоза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hu, D.** Design and Control of Hybrid Brake-by-Wire System for Autonomous Vehicle / D. Hu. – Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2022. – P. 31–42.

УДК 62-592.117

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ  
ПРИ ТЕПЛОВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТОРМОЗНОГО ДИСКА

А. А. МЕЛЬНИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

При проектировании тормозного диска, кроме статического моделирования диска под нагрузкой и оценки напряженно-деформированного состояния, целесообразно [1] проводить тепловой расчет фрикционного узла, который позволит определить эффективность отвода тепла воздухом, проходящим через вентиляционные отверстия тормозного диска. При этом особый интерес представляет пограничный слой [2] – область вязкотекучего потока воздуха, на которую большое влияние оказывают свойства стенки канала. При этом пограничный слой сравнивается по скорости и температуре с точкой контакта диска и несет основную нагрузку по отводу тепла.

Для теплового моделирования тормозного диска предлагается использовать гибридную сетку конечных элементов, состоящую из тетраэдров и структурированных призматических ячеек в зоне вентиляционных отверстий. Учитывая габариты тормозного диска и его характерные элементы геометрии, опытным способом установлено, что при уменьшении максимальной длины стороны призматической ячейки ниже 3 мм модель становится ресурсозатратной для расчета без ощутимого увеличения наглядности результатов моделирования. При этом остальной объем модели заполняется тетраэдрами, укрупняющимися по мере удаления от вентиляционных отверстий. Призматическая форма позволяет корректно отобразить резкий градиент температуры в пограничном слое при меньшем числе конечных элементов. В ходе экспериментов призматические элементы располагались перпендикулярно к направлению вентиляционного канала на диске диаметром 239 мм.

Предложенный метод создания сетки конечных элементов позволит получить более дискретизированные и пригодные для анализа результаты тепловой нагруженности тормозного диска в области вентиляционных отверстий, чем при использовании исключительно тетраэдной сетки конечных элементов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Математическая модель теплопередачи в дисковых фрикционных трансмиссий мобильных машин / В. П. Тарасик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 68–78.
2. **Reif, K.** Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems / K. Reif. – Springer Fachmedien Weisbaden, 2014. – P. 275.

УДК 629.113

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСКИ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ  
ТОРМОЗНОЙ ДИНАМИКИ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ

А. С. МЕЛЬНИКОВ, А. А. МЕЛЬНИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Выбирая в качестве показателей оценки динамики торможения тормозной путь и ускорение замедления, проводилась оценка влияния на них параметров подвески колесной машины.

Изменение жесткости передней и задней подвесок колесной машины проводилось в следующих пределах:  $C_{1,2} = 14$  кН/м,  $C_{1,2} = 12$  кН/м,  $C_{1,2} = 10$  кН/м,  $C_{1,2} = 8$  кН/м,  $C_{1,2} = 6$  кН/м.

Установлено, что при изменении жесткости передней подвески в указанных величинах изменение ускорения замедления при начальной скорости  $V = 11,1$  м/с составляет  $j_x = 4,290$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,402$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,418$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,481$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,542$  м/с<sup>2</sup> соответственно. Величина тормозного пути при изменении жесткости передней подвески в указанных величинах при начальной скорости  $V = 11,1$  м/с составляет  $S = 8,233$  м,  $S = 8,151$  м,  $S = 8,146$  м,  $S = 8,128$  м,  $S = 8,052$  м соответственно.

При изменении жесткости задней подвески в указанных значениях изменение ускорения замедления при начальной скорости  $V = 11,1$  м/с составляет  $j_x = 4,539$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,475$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,425$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,356$  м/с<sup>2</sup>,  $j_x = 4,300$  м/с<sup>2</sup> соответственно. Величина тормозного пути при изменении жесткости задней подвески в указанных значениях при начальной скорости  $V = 11,1$  м/с составляет  $S = 8,077$  м,  $S = 8,101$  м,  $S = 8,130$  м,  $S = 8,187$  м,  $S = 8,241$  м соответственно.

Рассматривая влияние показателей жесткости передней и задней подвесок на показатели эффективности торможения, проводилась также оценка влияния характеристик демпфирования на показатели эффективности торможения. Влияние на эффективность торможения проводилось при изменении параметров демпфирования передней и задней подвесок при следующих значениях:  $\alpha_1 = 2$  Н·с/м;  $\alpha_1 = 4$  Н·с/м;  $\alpha_1 = 6$  Н·с/м;  $\alpha_1 = 8$  Н·с/м. Изменение показателей эффективности торможения при различных параметрах демпфирования передней и задней подвесок не происходит.

Таким образом, можно видеть, что параметры подвески могут являться тем резервом, который позволит повысить тормозную эффективность, однако в данном случае необходимо учитывать также влияние характеристик подвески на управляемость и комфорт.

УДК 621.8

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ МАЛОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

А. Е. НАУМЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

На многих предприятиях для подъемно-транспортных операций при обслуживании оборудования используются механизмы грузоподъемностью до 5 т. К ним относятся краны мостовые однобалочные, краны консольные на колонне и краны полукозловые, управляемые с пола, в которых грузоподъемным механизмом является электрическая таль. Также электрические тали могут использоваться как самостоятельный грузоподъемный механизм, передвигающийся по монорельсовому пути, представляющему собой двутавр, подвешенный к строительным конструкциям цеха или открытой площадки.

В соответствии с п. 3 Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов (далее – Правила) [1] на краны мостового типа, управляемые с пола, грузоподъемностью до 10 т включительно и краны стрелового типа грузоподъемностью более 1 т действие Правил не распространяется. Однако в соответствии с п. 5 Правил по решению субъекта хозяйствования требования Правил могут быть применены для организации эксплуатации и производства работ с применением грузоподъемных кранов к следующим грузоподъемным кранам, не относящимся к потенциально опасным объектам: краны мостового типа и консольные краны грузоподъемностью до 10 т включительно, управляемые с пола, краны стрелового типа грузоподъемностью до 1 т включительно, а также электрические тали. Белорусско-Российский университет проводит техническое диагностирование таких грузоподъемных механизмов по заявкам эксплуатирующих их организаций.

При проведении технического диагностирования грузоподъемных механизмов малой грузоподъемности выявлены характерные для них дефекты, редко встречающиеся у кранов большой грузоподъемности. К таким дефектам можно отнести следующие.

1. Наличие отрицательного остаточного прогиба главной балки, в некоторых случаях приближающегося или превышающего допустимое значение, определяемого, как  $0,0022 \cdot L$  (где  $L$  – пролет крана).

Так, из 28 кранов мостовых однобалочных, подвергнутых техническому диагностированию в 2021–2023 гг., у 22 кранов обнаружен отрицательный остаточный прогиб, при этом у одного крана он приблизился к допустимому значению (составляет 94,3 % от допустимого), а у одного крана обнаружено превышение прогибом допустимого значения до 13,2 %.

2. Наличие значительных деформаций крюка. Грузовые крюки бракуются по двум показателям: износ крюка в криволинейной части (не более 10 %),

увеличение ширины зева крюков от проектной величины (не более 12 %). Данные дефекты наблюдаются у грузоподъемных механизмов малой грузоподъемности, работающих с траверсой, ухо которой «стирает» рабочую поверхность крюка), а также у грузоподъемных механизмов с интенсивным режимом работы (рис. 1, *а*). Данные дефекты были обнаружены примерно у 8 % кранов и талей, подвергнутых техническому диагностированию в 2021–2023 гг.

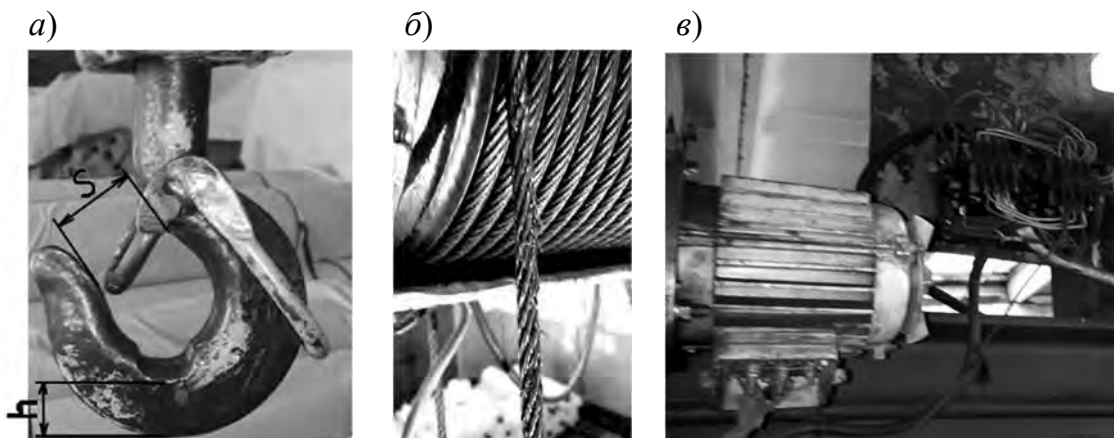


Рис. 1. Дефекты в грузоподъемных механизмах: *а* – дефекты крюка; *б* – обрывы проволок каната; *в* – дефекты электрооборудования

3. Дефекты канатов: наличие обрывов проволок, в количестве шести на длине 6 диаметров каната и 12 на длине 30 диаметров каната (рис. 1, *б*), уменьшение диаметра проволок в результате износа или коррозии (не более 40 %), уменьшение диаметра каната (не более 7 %), наличие волнистости, корзинообразности, выдавливания проволок из прядей, раздавливание прядей, заломы, перегибы, местное увеличение диаметра, повреждение от температурного воздействия или электродугового разряда. Данные дефекты связаны с высокой интенсивностью использования грузоподъемных механизмов малой грузоподъемности и наблюдаются примерно у 40 % таких механизмов.

4. Дефекты электрооборудования. К ним относятся: отсутствие крышек вентилятора электродвигателя, крышек клеммных коробок, обрывы оплеток электрокабелей, отсутствие заземления на металлоконструкцию (рис. 1, *в*). Данные дефекты наблюдаются у 60 % грузоподъемных механизмов и связаны с некачественным обслуживанием крана.

Таким образом, при проведении технического диагностирования грузоподъемных механизмов малой грузоподъемности необходимо особое внимание уделять контролю вышеперечисленных дефектов, т. к. они напрямую влияют на безопасность производства погрузочно-разгрузочных работ.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов: утв. постановлением М-ва по ЧС Респ. Беларусь 22 дек. 2018 г. № 66.

УДК 629.113

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОТОЦИКЛА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ

М. Л. ПЕТРЕНКО, В. И. ВАГУРО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Мотоцикл является объектом повышенной опасности на дороге общего пользования для водителя и других участников движения. Высокая вероятность возникновения потери курсовой устойчивости при маневрировании в городском потоке движения способна привести к аварийной ситуации [1].

Для повышения безопасности движения и курсовой устойчивости мотоцикл может быть оснащен системой активной безопасности. Существующие системы активной безопасности (далее – САБ), устанавливаемые на мотоцикл, функционируют на основе алгоритмов управления, использующих кинематические параметры в качестве критериев для управления исполнительными элементами в процессе торможения. САБ, управляемые на основе кинематических параметров, не обеспечивают безопасность в различных ситуациях, которые возникают в процессе торможения при изменении траектории движения.

Применение САБ на основе силовых факторов обеспечит повышение безопасности движения мотоцикла в процессе торможения в различных дорожных ситуациях. Применение источников информации на основе силовых факторов, возникающих в пятне контакта колеса с опорной поверхностью, в алгоритме управления САБ мотоцикла позволят повысить достоверность выработанных управляющих воздействий на органы управления мотоцикла для обеспечения устойчивости движения в процессе торможения [2].

Эффективность алгоритма управления САБ мотоцикла зависит от получаемых с датчиков сигналов. Для повышения достоверности и точности вырабатываемых управляющих сигналов требуется повысить достоверность вырабатываемых сигналов. Для получения сигналов от датчиков измерения силовых факторов в пятне контакта колеса с опорной поверхностью необходимо расположить датчики в точке, на которую минимально влияют сторонние воздействия, помехи и данная точка должна соответствовать возможности обеспечить технологичность крепления измерительных датчиков. При определении точек расположения датчиков измерения силовых факторов были проведены исследования передней и задней подвесок мотоцикла.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы создания САБ АТС на основе силового анализа / И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2016. – 118 с.: ил.
2. Петренко, М. Л. Компоненты антиблокировочной системы дорожного мотоцикла «Минск» на основе силовых факторов / М. Л. Петренко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2020. – Вып. 9. – С. 68–74.

УДК 629.113

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ДВС С БЛОКОМ ЦИЛИНДРОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

М. Л. ПЕТРЕНКО, В. Д. РОГОЖИН, П. В. БОГАЧЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Развитие конструкции современных двигателей внутреннего сгорания (далее – ДВС) имеет тенденции, связанные со снижением содержания вредных выбросов в окружающую среду в процессе работы и повышением развиваемой мощности двигателя внутреннего сгорания, приходящегося на рабочий объем двигателя [1].

С целью снижения содержания вредных выбросов в окружающую среду в отработавших газах двигателя внутреннего сгорания его основные части (блок цилиндров, головка блока цилиндров, поддон) изготавливаются из алюминиевых сплавов. Применение алюминиевых сплавов в конструкции основных деталей двигателя внутреннего сгорания позволяет улучшить теплопередачу и обеспечить более быстрый прогрев двигателя до заданной рабочей температуры.

Система охлаждения двигателя 1.4 TSI VAG CHPB / CZDA / CZEA [2] представлена на рис. 1.

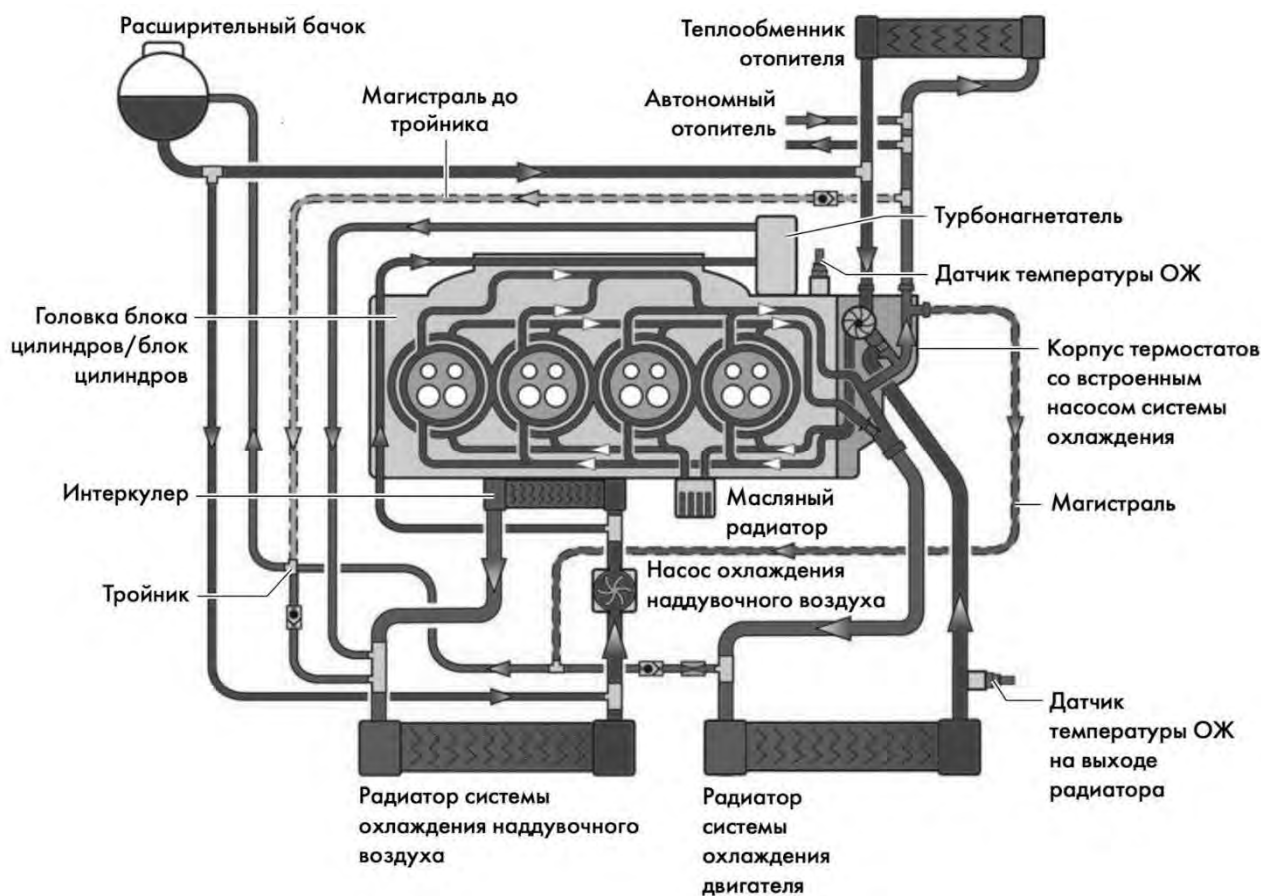


Рис. 1. Система охлаждения двигателя 1.4 TSI VAG CHPB / CZDA / CZEA



Система охлаждения двигателя 1.4 TSI VAG CNPB / CZDA / CZEА имеет особенность, которая заключается в протекании охлаждающей жидкости через весь блок цилиндров. Такое протекание охлаждающей жидкости приводит к возможности локального перегрева цилиндров из-за подачи к разным цилиндрам жидкости с разной температурой и недостаточным охлаждением четвертого цилиндра из-за подачи к нему уже прогретой рабочей охлаждающей жидкости. Такое расположение каналов и датчика температуры охлаждающей жидкости не позволяет выполнять контроль рабочей температуры и процессов, возникающих в точках, удаленных от термостата с насосом охлаждения и датчика температуры. В результате чего это может приводить к перегреву двигателя при возникновении поломок и дефектов в системе охлаждения двигателя.

Применение алюминиевых сплавов в конструкциях ДВС, в совокупности с конструктивными усовершенствованиями конструкции блока цилиндров ДВС и расположения каналов системы охлаждения, может приводить к сложной схеме перемещения охлаждающей жидкости. В результате этого образуются термически нагруженные места, где происходит локальный повышенный нагрев деталей, что может приводить к перегреву конструкции ДВС с отрицательными последствиями – потребности в дорогостоящем ремонте ДВС из-за повреждения деталей двигателя. Одним из проблемных мест ДВС с алюминиевым блоком цилиндров является система охлаждения. С целью снижения и облегчения массы деталей двигателя в конструкции системы охлаждения двигателя применяются пластмассовые элементы, что приводит со временем к образованию течи охлаждающей жидкости. Даже введение в конструкцию системы охлаждения двух термостатов не позволяет обеспечить корректную работу всей системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания. Результатом таких усовершенствований является потребность менять всю систему охлаждения и особенно пластиковых деталей к пробегу свыше 200 тыс. км.

Перспективным направлением исследования является определение критериев работоспособности системы охлаждения для конструкций ДВС из алюминиевых сплавов. Предотвращение перегрева ДВС способно повысить надежность и продлить срок эксплуатации ТС. Одним из путей решения проблемы с перегревом ДВС является использование встраиваемой системы контроля температуры для наиболее термонагруженных мест ДВС. Примером таких конструкций является ДВС 1.4 TSI VAG CNPB / CZDA / CZEА. В ходе исследования конструкции данного ДВС были определены места локального возрастания температуры и установлены причины, вызывающие отказы в работе системы охлаждения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобили: учеб.-метод. пособие / А. Н. Карташевич [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. – 424 с.: ил.
2. Двигатель Volkswagen CZDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://motorist.expert/volkswagen/czda.html>. – Дата доступа: 05.02.2024.

УДК 629.113

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ  
ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ С ГИБРИДНЫМИ СИЛОВЫМИ АГРЕГАТАМИ

А. В. РОГОЖИН

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Применение перспективных конструкций автомобилей с гибридными силовыми агрегатами (или комбинированными энергетическими установками, далее – КЭУ) позволит снизить отрицательное влияние выхлопных газов на окружающую среду [1]. Для поддержания в технически исправном состоянии ТС необходимо развитие и совершенствование производственно-технической базы (далее – ПТБ) по техническому обслуживанию и ремонту электромобилей (BEV + PHEV). Основное отличие конструкций ТС (BEV + PHEV) «микромикрибридов», «средних гибридов», «полных гибридов» от известных конструкций автомобилей заключается в наличии таких функций, как режим «старт-стоп», совместная работа ДВС и электродвигателя (далее – ЭД), рекуперация энергии, электрорежим [1, 2].

Для определения технического состояния транспортных средств с КЭУ необходимо диагностировать системы и агрегаты с учетом особенностей их конструкций. Наиболее предпочтительным методом определения технического состояния автомобилей с гибридными силовыми установками является использование инерционных стендов и определение исходных данных для их совершенствования. Один из путей развития ПТБ – определение исходных данных для совершенствования конструкций инерционных стендов при их моделировании работы на различных режимах движения ТС (BEV + PHEV). Для этого использовалась модель Power-Split Hybrid Transmission, выполненная в системе Matlab. Полученные результаты моделирования движения автомобилей с гибридными силовыми агрегатами позволили определить изменение силы тока, емкости и потерь в ВВБ, скорости автомобиля и расхода топлива.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбинированные энергетические установки транспортных средств / Е. Е. Баулина [и др.]. – Москва: Тракторы и сельхозмашины, 2014. – 105 с.
2. Ютт, В. Е. Электромобили и автомобили с комбинированной энергоустановкой. Расчет скоростных характеристик: учебное пособие / В. Е. Ютт, В. И. Строганов. – Москва: МАДИ, 2016. – 108 с.
3. Технологии ремонта и обслуживания гибридных автомобилей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://abs-magazine.ru/article/tehnologii-remonta-iobslyujvaniya-gibridnih-avtomobiley>. – Дата доступа: 01.02.2022.

УДК 629.33-004

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЕЙ

С. А. РЫНКЕВИЧ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Мониторинг технического состояния автомобилей необходим для повышения безопасности и заблаговременного предотвращения внеплановых поломок и остановок из-за неисправностей и опасных отказов деталей и механизмов. Для оперативного упреждения нештатных ситуаций используется так называемый активный мониторинг. Он осуществляется в режиме реального времени при условии оснащения автомобиля современными средствами бортовой микроэлектроники.

Эксплуатационные свойства автомобиля – это комплекс качеств, определяющих его приспособленность к эксплуатации в качестве транспортного средства. Эксплуатационные свойства автомобиля представлены гаммой важнейших качеств. Это динамичность, топливная экономичность, устойчивость, управляемость, маневренность, проходимость и плавность хода.

Все перечисленные свойства непрерывно контролирует бортовая электронная система (БЭС), которая выводит на информационную панель (дисплей в кабине водителя) значения показателей и ограничения, характеризующие автомобильные качества. Например, свойство динамичности, которое определяется максимальными скоростями  $v_{\max}$  и ускорениями  $a_{\max}$  прямолинейного движения автотранспортного средства (АТС) в разных дорожных ситуациях (возможностью резко повышать или снижать скорость АТС), оперативно отслеживается по таким показателям, как  $v_{\max}$ ,  $a_{\max}$ ,  $\dot{j}_{\max}$ .

Важным показателем безопасности здесь является джерк  $j$  (рывок),  $\text{м/с}^3$ , который характеризует темп (скорость) изменения ускорения тела:

$$j = \frac{da}{dt}.$$

Понятие джерка используется при организации пассажирских и грузоперевозок. В случае перевозок пассажиров важно обеспечить безопасность людей, испытывающих при разгоне и при резких торможениях автобуса различного рода перегрузки и неудобства. Недопустимо, чтобы стоячий пассажир потерял равновесие, а сидячий получил травмы. Величина  $|j|$  контролируется бортовой микроэлектроникой таким образом, чтобы она не превысила предельно допустимых значений.

При перевозке ценных и хрупких грузов важно при резких поворотах и торможениях обеспечить их целостность, неразрывность и сохранность.

Контроль и мониторинг курсовой устойчивости осуществляется подсистемой (Electronic Stability System или ESC), которая помогает предотвратить пробуксовку и крен кузова автомобиля. ESC активируется в критических ситуациях, когда происходит отклонение от заданной траектории движения АТС (при резком маневрировании, заносе и т. п.).

Большинство дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходит тогда, когда происходит нарушение движения АТС вдоль продольной плоскости колёс из-за снижения сил сцепления шин с дорожным полотном, а точнее, когда боковые силы превышают эти силы сцепления.

Электронная система ESC выявляет момент, когда шины АТС начинают терять сцепление с дорогой, и немедленно уменьшает частоту вращения коленчатого вала двигателя. При этом требуемое колесо притормаживается, стабилизируя движение. 20 мс – это длительность реакции системы стабилизации курсовой устойчивости.

Согласно результатам исследований ДТП различного рода, особенно со смертельным исходом, проведенных в Германии (Universität zu Köln), более ста тысяч ДТП можно было бы предотвратить, если бы автомобили были оснащены современной системой ESC. Неспроста ESC называют «ремнем безопасности XXI века». Так, по данным компании «Мерседес», установка на автомобиле ESC позволила на 30 % уменьшить число единичных аварий. По данным корпорации «Тойота», количество аварий снизилось на 25 %...30 %.

Электронная система мониторинга курсовой устойчивости является системой удержания АТС в стабильном динамическом положении за счет оперативного импульсного притормаживания отдельных колес. Это своего рода активная система безопасности автомобиля, позволяющая предотвратить занос посредством регулирования вращающего момента колес.

Однако есть существенные ограничения при использовании подобных систем. Если АТС располагает слишком «мягкой» подвеской либо колеса имеют плохое сцепление с опорной поверхностью дороги (сильный износ шин), то риск потери курсовой устойчивости велик, и система ESC вряд ли здесь поможет.

БЭС осуществляет мониторинг плавности хода АТС, обеспечивая качественное и комфортное для человека (водителя и пассажиров) преобразование энергии удара при наезде АТС на неровность. Плавность хода играет важную роль в обеспечении безопасности дорожного движения. Хорошие качества плавности хода автомобиля позволяют водителю лучше контролировать процесс движения и реагировать на всевозможные опасности.

Для мониторинга топливной эффективности рассчитывается средний расход топлива  $Q_{cp}$ , который рассчитывается при преодолении пути в 100 км. Показатель  $Q_{cp}$  оценивается в количестве литров на 100 км (например, 7,5 л/100 км). В большинстве стран Востока, в том числе Японии, для оценки топливной эффективности учитывают пробег, при этом рассчитывают путь, который пробегает АТС при расходе 1 л топлива, т. е. топливная экономичность автомобиля в этом случае оценивается в километрах на литр.

При мониторинге маневренности БЭС проверяет радиусы поворота (РП) АТС, габаритные РП, а также отслеживает ширину полосы, на которой производится поворот (для автопоездов), и смещение оси прицепа относительно оси тягача.

УДК 629.113

## РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ

И. С. САЗОНОВ, О. А. ПОНОМАРЕВА, О. В. БЛАГОДАРНАЯ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Для адекватной оценки параметров плавности хода автомобиля необходимо учитывать частоту собственных колебаний кузова, т. е. резонансную частоту системы, которая образована упругостью подвески и массой кузова. Негативная реакция организма человека на колебания кузова зависит от частоты, амплитуды и продолжительности колебаний. Положение статического равновесия кузова на подвесках осей является условием для возникновения колебаний в системе «кузов – оси».

При движении автомобиля по дороге с твердым покрытием колебания происходят почти с постоянной жесткостью подвесок. При оценке жесткости шин и упругих элементов подвески каждой из осей легкового автомобиля можно считать колебания кузова малыми, характеристику элементов подвесок – линейной, а шины колес рассматривать недеформируемыми. На основании этого получаем уравнения [1], описывающие малые свободные колебания кузова для обобщенных координат (отклонение центра масс от положения равновесия и угол поворота вокруг центра масс  $\varphi$ ):

$$z_c = \frac{v_0}{(p_1 - p_2)} \left( \frac{p_1}{\omega_{c1}} \cdot \sin \omega_{c1} t + \frac{p_2}{\omega_{c2}} \cdot \sin \omega_{c2} t \right);$$

$$\varphi = \frac{v_0}{(p_1 - p_2)} \left( \frac{1}{\omega_{c1}} \cdot \sin \omega_{c1} t - \frac{1}{\omega_{c2}} \cdot \sin \omega_{c2} t \right).$$

На сглаживание и скорость затухания свободных колебаний оказывают влияние амортизаторы. Затухающие гармонические колебания кузова описываются системой уравнений, решение которой представлено в следующем виде [1]:

$$z_{c3} = \frac{v_0}{(p_1 - p_2)} e^{-\beta t} \left( \frac{p_1}{\omega_{c1}} \cdot \sin \sqrt{\omega_{c1}^2 - \beta^2} \cdot t - \frac{p_2}{\omega_{c2}} \cdot \sin \sqrt{\omega_{c2}^2 - \beta^2} \cdot t \right);$$

$$\varphi_3 = \frac{v_0}{(p_1 - p_2)} e^{-\beta t} \left( \frac{1}{\omega_{c1}} \cdot \sin \sqrt{\omega_{c1}^2 - \beta^2} \cdot t - \frac{1}{\omega_{c2}} \cdot \sin \sqrt{\omega_{c2}^2 - \beta^2} \cdot t \right).$$

Используя данные зависимости, можно подобрать упругие элементы и амортизаторы подвесок наилучшим образом на стадии проектирования автомобиля.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов, И. С. Расчет параметров колебаний кузова легкового автомобиля / И. С. Сазонов, О. В. Билык // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 4. – С. 17–19.

УДК 621.8

## ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫМИ МАШИНАМИ

В. И. СЁМЧЕН

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В сфере использования подъемно-транспортных машин проявляется тенденция к сохранению человеческих потерь вследствие аварий при осуществлении подъемно-транспортных операций. В связи с этим необходимо совершенствовать существующие и применять новые решения по безопасному производству подъемно-транспортных работ.

Безопасность выполнения работ подразумевает такие эксплуатационные качества подъемных механизмов, которые предотвращают или снижают вероятность возникновения аварийных ситуаций, а в случае их возникновения предотвращают или снижают степень воздействия вредных факторов на жизнь и здоровье работников.

В целом, безопасность подъемной машины может быть представлена как комплекс средств активной и пассивной безопасности.

Активная безопасность – это конструктивное свойство подъемной машины или оборудования предотвращать или снижать вероятность возникновения аварийной ситуации.

Нормативные документы в области промышленной безопасности требуют обязательных конструктивных решений, наличия устройств и приборов безопасности для предотвращения аварийных ситуаций.

Пассивная безопасность – это комплекс конструктивных особенностей, обеспечивающих снижение тяжести последствий возникшей аварийной ситуации путем уменьшения инерционных нагрузок на работников, ограничивающих перемещение и предотвращающих выбрасывание их из кабин кранов и платформ подъемников, осуществляющих защиту при ударе.

Анализ нормативных, патентных и технических документов выявляет следующие тенденции. Вся подъемно-транспортная техника в обязательном порядке оборудуется средствами активной безопасности и активно ведутся работы по совершенствованию этих приборов и устройств. Практически отсутствуют требования нормативных правовых актов и технические решения по использованию средств пассивной безопасности для подъемно-транспортной техники.

Дальнейшее повышение безопасности проведения работ подъемно-транспортными машинами, снижение вреда жизни и здоровью людей требует разработки законодательных норм и соответствующих им технических решений в области пассивной безопасности подъемно-транспортного оборудования.

УДК 621.929

## ВОЛНОВОЙ СМЕСИТЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ю. М. ХАРИТОНОВ, Л. А. СИВАЧЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Смешивание – один из важнейших технологических процессов, имеющий своей целью получение из нескольких различных компонентов однородной смеси, обладающей новыми, по сравнению с исходными веществами, свойствами [1]. Смесительные машины для этого процесса должны обладать высокой производительностью, низким энергопотреблением, простотой обслуживания и ремонта, а также комфортными условиями работы. Известно множество смесительных машин и их разработка постоянно продолжается. Основными причинами этого являются растущее разнообразие обрабатываемых материалов и повышение требований к качеству получаемой смеси.

Одним из направлений развития смесителей принудительного действия может быть использование в качестве основного рабочего оборудования гибких волнообразных поверхностей, которые выполнены из эластичного материала и связаны с приводом, расположенным с их внешней стороны, а сами эти поверхности образуют смесительную камеру, причем их различные зоны создают разнонаправленные интенсивные периодические движения. Определенными прототипами такого подхода могут служить, например, деформируемые цилиндрические оболочки или цепные агрегаты, рабочие поверхности которых состоят из цепных гирляндных завес [2], однако эти конструкции являются технически сложными и не обеспечивают хорошее качество перемешивания, особенно тонкодисперсных смесей.

Смеситель предлагаемой конструкции, схема которого приведена на рис. 1, содержит раму 1, рабочую камеру 2, выполненную в виде установленного под углом к горизонту волнового гибкого лотка и связанную посредством кривошипно-шатунного механизма 3 с приводом её перемещений. Рабочая камера 2 своими верхними боковыми кромками жестко закреплена на прямоугольной раме 4, которая посредством кронштейнов 5 шарнирно подвешена на раме 1 с возможностью совершения качательных движений под действием кривошипно-шатунного механизма 3 в направлении, перпендикулярном её продольной оси, причём в рабочей камере 2 для интенсификации процесса перемешивания смонтированы наборы цепных элементов 6, концы которых неподвижно закреплены на противоположных планках прямоугольной рамки 4 и свободно провисают эквидистантно относительно волнового гибкого лотка.

Рабочий процесс смесителя происходит следующим образом. Кривошипно-шатунный механизм 3 приводится в движение и позволяет прямоугольной раме 4, на которой закреплена рабочая камера 2, совершать качательные движения, благодаря кронштейнам 5, на которых она подвешена. В верхнюю часть рабочей камеры 2 подаются исходные компоненты смеси, перемешивание которых происходит за счет качательных движений прямоугольной рамы 4,

которая посредством кронштейнов 5 шарнирно подвешена на раме 1, а также наличия интенсификаторов процесса перемешивания в виде набора цепных элементов 6, закрепленных на прямоугольной раме 4, с одновременным продвижением вдоль оси рабочей камеры 2.

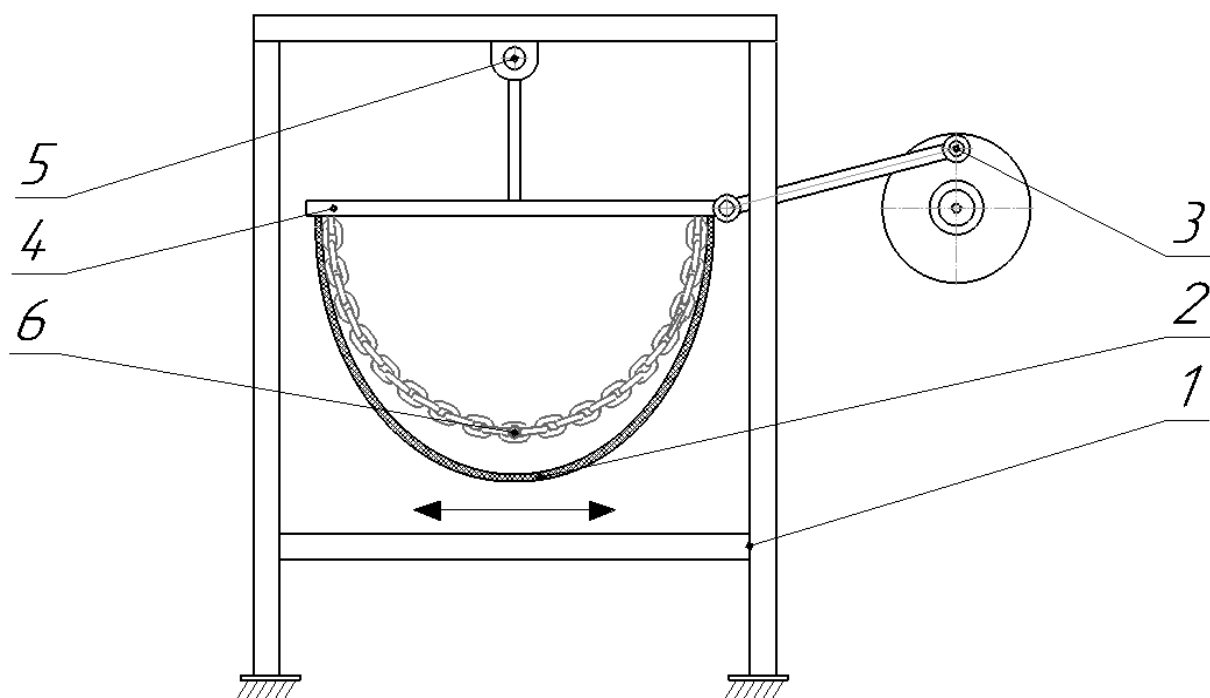


Рис. 1. Волновой смеситель непрерывного действия

Предлагаемое оборудование может быть использовано как в составе действующих технологических линий, так и для создания на их основе принципиально новых. В первом случае речь можно вести о простой замене одного вида оборудования на другое, во втором – о проектировании производственного комплекса с улучшенными технологическими показателями и эффективностью работы. Для успешного достижения этих целей требуется, в первую очередь, довести до технического и технологического совершенства конструкцию смесителя, что связано с решением целого ряда достаточно сложных задач.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов, Ю. М. Смеситель принудительного действия с деформируемой рабочей камерой / Ю. М. Харитонов, Л. А. Сиваченко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – 196 с.
2. Интенсификация технологических процессов на основе аппаратов адаптивного действия: монография / Л. А. Сиваченко [и др.]; под ред. Л. А. Сиваченко. – Барановичи: БарГУ, 2020. – 359 с.



УДК 625.7

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛ НА ИЗМЕЛЬЧАЕМУЮ ЧАСТИЦУ МАТЕРИАЛА В РЕССОРНО-СТЕРЖНЕВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Е. А. ШАРОЙКИНА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В процессе работы рессорно-стержневой мельницы исходный материал подаётся в зону измельчения, при этом включается вибратор, передавая колебания стержням. В процессе возвратно-поступательных движений происходит соударение стержней с элементами материала, что приводит к их разрушению. Материал, проходя под рабочими элементами, измельчается и перемещается за счёт вибрации и наклона лотка.

Изучим механизм единичного акта разрушения частицы, произведём расчёт воздействия рабочего органа мельницы на частицу клинкера и выявим процессы в частице, в результате которых происходит её разрушение (рис. 1).

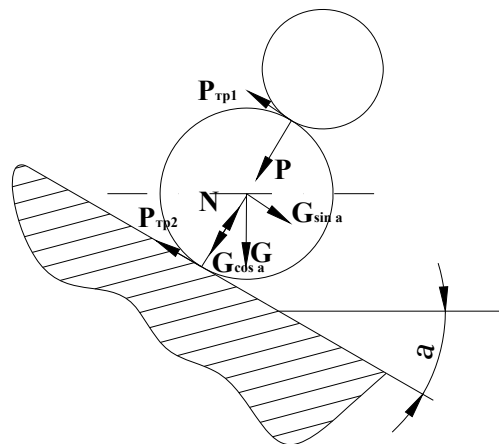


Рис. 1. Схема воздействия сил на частицу измельчаемого материала

Определим силу, действующую на частицу материала в процессе измельчения, при единичном нагружении следующим образом:

$$P_{нагр} = P_{давл} \cdot (n_{стерж} \cdot n_{кол.част.прод.одн.ст.})^2 + g(m_{вибр} + m_{пр}) =$$

$$= 5000 \cdot (20 \cdot 12)^2 + 9,81(200 + 200) = 988003924 \text{ Па},$$

где  $P_{давл}$  – давление, создаваемое на частицу материала от усилия вибратора, Н;  $m_{вибр}$  – масса вибратора,  $m_{вибр} = 20$  кг;  $m_{пр}$  – масса стержней и опоры,  $m_{пр} = 20$  кг;  $n_{стерж}$  – количество стержней,  $n_{стерж} = 20$  шт.;  $n_{кол.част.прод.одн.ст.}$  – количество частиц, попадающих под один стержень,  $n_{кол.част.прод.одн.ст.} = 12$  шт.

УДК 629.114.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОСТИ ГРУЗОВЫХ БЕСПИЛОТНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Э. И. ЯСЮКОВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В настоящее время наблюдаются тенденции, формирующие новое понимание мобильности колесных машин, т. е. их способности самостоятельно ориентироваться на дороге, принимать решения и реагировать на дорожные ситуации без водителя. Таким образом, мобильность является одним из важнейших показателей эффективности курсового движения колесных машин, эксплуатируемых в реальных дорожных и климатических условиях без водителя.

При движении колесных машин сцепления шин их колес с опорной поверхностью зависят от многих факторов, определяющихся категориями дорог, атмосферными показателями и т. д.

Важными показателями эффективности курсового движения беспилотных колесных машин являются оценки их курсовой устойчивости и управляемости, определяемые с учетом вертикальной динамики при движении по дорогам с реальными транспортно-эксплуатационными характеристиками.

Цель исследований заключалась в использовании разработанной имитационной математической модели и программного обеспечения [1] для оценки мобильности беспилотных колесных машин при движении их по опорным поверхностям, характеристики которых задаются в процессе курсового движения.

На основе указанной математической модели разработано программное обеспечение для выполнения имитационного моделирования и расчетных исследований управляемого курсового движения колесной машины по реальным дорогам, которое используется для оценки мобильности грузовых беспилотных колесных машин при движении их по дорогам с реальными микро- и макро-профилями.

Получаемые результаты расчетных исследований представляются в виде показателей зависимости управляемого курсового движения колесной машины от ее массогеометрических параметров и упругодиссипативных характеристик подвески и шин. Получаемые результаты расчетных исследований представляются в виде последовательностей числовых значений, по которым строятся необходимые графические зависимости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ясюкович, Э. И. Имитационное моделирование курсового движения трехосного автомобиля со всеми управляемыми колесами / Э. И. Ясюкович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 60–67.

УДК 630.81

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ПРОДУКЦИИ ЛЕСА

Т. Н. АГЕЕВА, О. В. ВАЛЬКО, А. В. ЩУР

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Республика Беларусь развивает территории, загрязненные радионуклидами, в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. Следует отметить, что проблемы получения нормативно-чистой продукции сельского хозяйства уже практически решены. В общественном секторе наблюдаются единичные случаи превышения содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в продукции. В то же время серьезной проблемой остается качество продукции леса.

Жители районов, подвергшихся радиоактивному загрязнению, регулярно посещают леса и собирают грибы, ягоды и лекарственное сырье. При этом в большинстве случаев радиационный контроль продукции не производится [1–4]. Кулинарная обработка грибов и ягод безусловно снижает содержание в них радиоактивных элементов, но при регулярном потреблении указанных продуктов, накопление в организме все же происходит [1, 3]. Уровни накопления нуклидов не столь высоки, как в первые годы после катастрофы, но в некоторых районах до сих пор достаточно значимые. Разъяснительная работа с населением дает свои результаты и наблюдается тренд снижения поглощенных доз радиоцезия. При обследовании различных когорт жителей установлено, что наибольшие уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме наблюдаются у социально-активной части жителей – они активно посещают лес, заготавливают грибы и ягоды в значительных количествах и регулярно потребляют их в пищу на протяжении всего года. Как отмечено ранее, в таких случаях уровень содержания нуклидов достаточно высокий, т. к. их выведение из организма занимает около трёх месяцев, и при регулярном поступлении выведение не успевает очистить организм. Наиболее высокие уровни поглощенных доз радионуклидов наблюдались у охотников, что связано с более быстрым метаболизмом мяса по сравнению с грибами и, соответственно, большим накоплением в организме нуклидов. К сожалению, очень часто дичь не проверяется на содержание нуклидов, к тому же факты незаконной добычи имеют место. Такая дичь никогда не проверяется на содержание нуклидов. Важным фактором является и то, что миграция животных может составлять десятки и сотни километров за сезон. Поэтому даже на «чистых» территориях не исключена возможность отстрела животных с высокими уровнями содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме. В случаях

отсутствия проведения радиометрии животного сырья, возможно потребление мяса со значительным превышением нормативов содержания нуклидов. Наиболее опасно потребление загрязненных продуктов детьми, т. к. высокий уровень метаболизма приводит к значительной ассимиляции нуклидов растущим организмом, что может привести к возникновению отклонений в росте и развитии [3]. В случае, если ребенок в основном питается в учреждении образования (детский сад, школа), а дома питается покупной едой, то уровни поглощенных доз ничтожны. В принципе такая же тенденция наблюдается и у пожилых людей, в рационе которых отсутствует продукция леса и, в основном, присутствует покупная еда.

Таким образом, на наш взгляд, для снижения уровня радиоактивного загрязнения организма наиболее важным является регулярный радиационный контроль продуктов леса перед их употреблением.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеева, Т. Н. Влияние факторов леса на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в организме сельского населения, проживающего на территории радиоактивного загрязнения / Т. Н. Агеева, Т. И. Чегерова, А. В. Щур // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – Минск: НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Респ. Беларусь, 2009. – Т. 1. – С. 29–31.

2. Видовая специфика накопления  $^{137}\text{Cs}$  лесной флорой нижнего яруса / А. В. Щур [и др.] // Почва, удобрение, урожай: материалы Междунар. науч.-практ. конф. в рамках Междунар. науч.-практ. форума, Горки, 23–25 июня 2010 г. – Горки: Белорус. гос. с.-х. акад., 2010. – С. 269–272.

3. Дозы внутреннего облучения детей Славгородского района Могилевской области / Т. Н. Агеева [и др.] // Чернобыльские чтения – 2012 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 19–20 апр. 2012 г. – Гомель, 2012. – С. 51–53.

4. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  растительностью лесных экосистем Чериковского района Могилевской области при разных уровнях радиоактивного загрязнения почвы / А. В. Щур [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – Минск: НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Респ. Беларусь, 2009. – Т. 3. – С. 312–315.

УДК 69:658.7

## ПЛАНИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ГРАФИКА СНАБЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Я. Д. АГЕЕВА<sup>1</sup>, А. А. ЛАПИДУС<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет  
Москва, Россия

Одним из важнейших компонентов бесперебойного ведения строительно-монтажных работ (СМР) является эффективное планирование поставок материально-технических ресурсов, однако ввиду влияния множества факторов, обусловленных спецификой строительного производства, необходимо учитывать сроки выполнения работ и доставки материалов, их качество, стоимость, а также возможные изменения в проекте, влияющие на потребление ресурсов. Кроме того, необходимо учитывать локальные условия и доступность ресурсов в конкретном регионе, а также потенциальные риски, связанные с транспортировкой и хранением материалов.

Планирование поставок в строительстве усложняется ввиду влияния факторов, вызванных строительством в условиях плотной городской застройки, что повышает риск задержки и некомплектной поставки материалов.

Проблемой осуществления строительно-монтажных работ в условиях плотной городской застройки является отсутствие конкретной методики, позволяющей определить оптимальный план снабжения ввиду различной степени влияния условий стесненности. Это вынуждает учитывать все особенности выполнения работ на каждом отдельном строительном объекте, что, в свою очередь, ведет к увеличению издержек производства [1].

Оптимальное поведение системы характеризуется тем, что независимо от начального состояния и принятого решения в начальный момент, последующие решения должны быть оптимальными относительно состояния, возникающего после первого решения [2]. Ввиду отсутствия строгой математической формулировки в основе методологии динамического программирования данный подход позволяет разработать оптимизационную модель, подходящую для решения конкретной пользовательской задачи [3]. Общим параметром оптимальности в данной задаче является минимизация затрат на погрузочно-разгрузочные операции и содержание технологических запасов (страховых и производственных):

$$F(Q_{st}, q_{sup}) = \sum_{i=1}^n (C_{st} Q_{st_i} + C_{sup} q_{sup_i}) \rightarrow \min, \quad i = 1, \dots, n,$$

где  $q_{st}$  – оптимальный объем хранения в  $i$ -й момент времени;  $Q_{sup}$  – оптимальный объем поставки в  $i$ -й момент времени;  $C_{st}$ ,  $C_{sup}$  – стоимость хранения и стоимость потребления соответственно.

Для оптимизации снабжения необходимо разделить производственный процесс на этапы, которые ведутся параллельно и последовательно в соответствии с календарным графиком СМР. Оптимальный уровень запаса на протяжении всего времени выполнения работ определяется как сумма интегралов функции пополнения и потребления на каждом этапе, обеспечивая минимальный, но достаточный объем хранения ресурсов:

$$\overline{Q}_{st} = \sum_{i=1}^n \left( \int_{T_{ni}}^{T_{ext_i}} I_r dt + \int_{T_{ext_i}}^{T_{ki}} I_c dt \right),$$

где  $T_n$  – момент времени начала  $i$ -го этапа;  $T_k$  – момент времени конца  $i$ -го этапа;  $T_{ext}$  – момент пересечения возрастающей функции пополнения и убывающей функции потребления  $i$ -го этапа;  $I_r$  – интенсивность пополнения в момент времени  $t$ ;  $I_c$  – интенсивность потребления в момент времени  $t$ .

Диапазон изменения значения оптимального объема поставки  $q_{sup}$  находится в пределах, границы которого соответствуют значениям, равным суточному потреблению ресурса и максимальному объему загрузки транспортного средства с учетом коэффициента грузоподъемности:

$$q_{сум} \leq q_{sup_i} \leq q_{TC} \gamma.$$

Для нахождения решений целевой функции на каждом  $n$ -м шаге требуется решить  $n$  рекуррентных соотношений. Согласно принципу оптимизации Р. Беллмана, каждое следующее решение на шаге  $n + 1$  будет оптимальным (минимальным) вне зависимости от решения, полученного на предыдущем шаге  $n$ . Количество шагов равно количеству этапов строительно-монтажных работ, на которые был разделен процесс возведения здания:

$$F_{n+1}(Q_{st}) = \min F \left[ C_{st}(Q_{st(n+1)} + Q_{st_n}) + C_{sup}(q_{sup(n+1)} + q_{sup_n}) \right].$$

Оптимальные значения поставок ресурсов, полученные на каждом шаге  $n$ , могут быть применены в процессе планирования графика снабжения строительного производства. Получаемые значения объемов хранения на каждом шаге  $n$  позволяют определить возможность складирования на приобъектной территории или потребность в организации дополнительных складских помещений вне строительной площадки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Максимов, Р. И.** Проблемы строительства зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки / Р. И. Максимов // Интерактивная наука. – 2021. – № 7 (62). – С. 24–26.
2. **Mizutania, E.** Tutorial on the art of dynamic programming for some issues concerning bellman's principle of optimality / E. Mizutania, S. A. Dreyfus // ICT Express. – 2023. – Vol. 9. – P. 1144–1161.
3. **Sun, J.** Presenting a mathematical model for reduction of delays in construction projects considering quality management criteria in uncertainty condition / J. Sun, A. Apornak, G. Ma // Journal of engineering research. – 2023.

УДК 504.453

## ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А. М. БРАНОВИЦКИЙ, В. Т. ПАРАХНЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Автомобильные дороги, активно вторгаясь в природную среду, в значительной степени оказывают на нее негативное влияние. Одним из факторов такого влияния является загрязнение окружающей среды сточными водами автомобильных дорог. Этот фактор имеет тенденцию к прогрессированию как ввиду развития сети автомобильных дорог, так и ввиду увеличения интенсивности движения автомобильного транспорта. Несмотря на то, что вот уже на протяжении нескольких десятилетий вопросу очистки сточных вод автомобильных дорог уделяется определенное внимание, решение его находится пока еще в неудовлетворительном состоянии. Это связано с рядом проблем, которые приходится решать при очистке сточных вод автомобильных дорог. Во-первых, это протяженность самих автомобильных дорог, во-вторых – многообразие состава загрязнений, требующих определенной технологии очистки. Необходим тщательный анализ состава загрязнений таких сточных вод, что позволит адаптировать для них уже существующие технологии очистки, а в ряде случаев для конкретных условий потребуются разработка новых технологий очистки. Для решения этой проблемы необходимы соответствующие сведения из области проектирования и строительства дорог, а также из области очистки канализационных стоков.

Опыт эксплуатации автомобильных дорог позволяет выделить некоторые источники загрязнения: соли и песок, используемые для борьбы с гололедом; продукты износа двигателей и движущихся деталей автомобилей (металл, резина); различные виды нефтепродуктов (горюче-смазочные материалы); продукты сжигания топлива; отходы предприятий обслуживания автотранспорта и ремонта дорожных сооружений; потери сыпучих грузов, перевозимых автотранспортом; продукты износа поверхности дорог.

Несмотря на многообразие состава загрязнений стока автомобильных дорог, представляется возможность их классифицировать по некоторым основным группам: минеральные (песок, глина, шлак); химические вещества (в основном реагенты противогололедных материалов); нефтепродукты (смазочные масла и др.); в незначительном количестве загрязнения органического характера (растительного происхождения). По степени воздействия на окружающую среду на первом месте находятся химические вещества, перечень которых весьма многообразен (соли кальция и магния, карбамид, хлористый натрий и др.). Несколько меньшее влияние оказывают нефтепродукты и загрязнения органического характера.

По объему сточных вод и по технологии их очистки бытовая канализация имеет значительное преимущество в сравнении с другими видами канализации.

Коммунальные стоки по составу содержат минеральные включения, в основном это песок различной фракции. Органическая фракция представляет пищевые отходы, бумагу и др.

Коммунальные стоки подвергаются механической очистке (отстаивание, фильтрование), биологическая (использование анаэробных микроорганизмов), в ряде случаев используется и химическая очистка. Тенденция очистки канализационных стоков направлена в сторону развития биологической очистки. При очистке канализационных стоков широко используются реагенты. Это позволяет ускорить процесс очистки и повысить его качество, что значительно удорожает процесс очистки.

Особое место занимают промышленные стоки. Перед сбросом промышленных стоков в общесплавную канализацию непосредственно на предприятиях проводится их очистка, которая характеризуется использованием различных физико-химических процессов. Для экономии энергоресурсов практикуется повторное использование воды, а также замкнутые циклические процессы.

По составу и характеру загрязнений сточных вод с поверхности автомобильных дорог наиболее близки технологии очистки бытовых стоков. Так, минеральные составляющие сточных вод автомобильных дорог предпочтительно удалять путем отстаивания и фильтрации. Для удаления нефтепродуктов технология очистки бытовых стоков не совсем подходит. Также перспективным направлением очистки является использование некоторых видов растений, которые в процессе своей жизнедеятельности способны поглощать и перерабатывать нефтепродукты [1, 2].

Выводы.

1. Сточные воды с поверхности автомобильных дорог имеют значительные загрязнения и требуют соответствующей очистки.

2. Технология очистки сточных вод автомобильных дорог требует детальной проработки и совершенствования.

3. Существующие технологии очистки воды с определенной адаптацией могут быть использованы при очистке стоков автомобильных дорог.

4. Для удаления нефтепродуктов из стоков автомобильных дорог можно рекомендовать использовать биологические методы очистки некоторыми видами растений.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чачина, С. Б.** Использование биотехнологических методов доочистки нефтесодержащих сточных вод промышленных предприятий / С. Б. Чачина, О. А. Таранникова // Междунар. журн. приклад. и фундам. исслед. – 2014. – № 8–3. – С. 23–27.

2. **Ерохина, Н. И.** Транслокация в растения вредных веществ активного ила биологической очистки нефтесодержащих сточных вод / Н. И. Ерохина, Л. И. Трубникова, Н. А. Киреева // Агрехимия. – 2008. – № 1. – С. 68–75.



УДК 624.072.14

## МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАВНОРИТМИЧНОГО ПОТОКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

О. В. ГОЛУШКОВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Основными организационно-технологическими документами по организации строительства являются проект организации строительства и проект производства работ. При разработке ПОС определяется продолжительность выполнения работ и нормативная продолжительность строительства объекта в целом [1]. Общую продолжительность строительства определяем из календарного или комплексного сетевого графика. К разрабатываемому календарному графику предъявляется ряд условий: выполнение и взаимоувязка всех работ должна соответствовать технологии их выполнения, график должен быть сбалансирован по продолжительности и оптимальному составу трудовых ресурсов, которые определяются коэффициентом неравномерности движения рабочих [2].

Если мы говорим о построении календарного графика с выполнением полного комплекса работ на высотный объект, то следует учитывать, что обычное последовательное выполнение работ по этажам просто не позволит вложиться в нормативные сроки строительства. Следовательно, необходимо с учетом мощности объекта разбивать его на захватки – постоянные неделимые части и выполнять разноименные работы параллельным, а одноименные работы последовательным методами с учетом требований охраны труда и условий безопасного производства работ. В результате такой организации производства работ получим поточное производство, которое будет базироваться на ритмичном выполнении комплексов работ по возведению объекта.

При разработке модели сетевого графика для одноподъездного жилого дома свыше пяти этажей принимаем за захватку этаж дома и далее все работы по возведению надземной части здания и выполнению отделочных работ осуществляем поэтажно, последовательно с разбежкой в один-два этажа, с целью обеспечения безопасных условий производства работ. Однако все эти работы относятся к разным циклам возведения объекта и могут значительно отличаться по продолжительности выполнения работ и составу бригады на каждом отдельном этаже, даже при условии, что они типовые. Это приводит к неритмичному производству работ – продолжительность выполнения работ не является одинаковой на однотипных захватках при выполнении разных работ и сильно изменяются критерии оптимального количества рабочих.

Уравновесить данное состояние с учетом оптимального количества рабочих предлагается с помощью двух методов.

1. Выполнять каждую последующую работу на захватке постоянным составом рабочих кадров, изменяя их численность на ручных процессах, или выполняемых с помощью средств малой механизации, при этом изначально

задаемся той же продолжительностью, что и основная работа, выполняемая с помощью грузозахватных машин (башенных и автомобильных кранов) (рис. 1).

2. Ввести в каждый последующий поток элемент кратности продолжительности выполняемых строительных процессов относительно исходной, ранее выполненной, работы посредством введения ожидания на захватках (рис. 2).

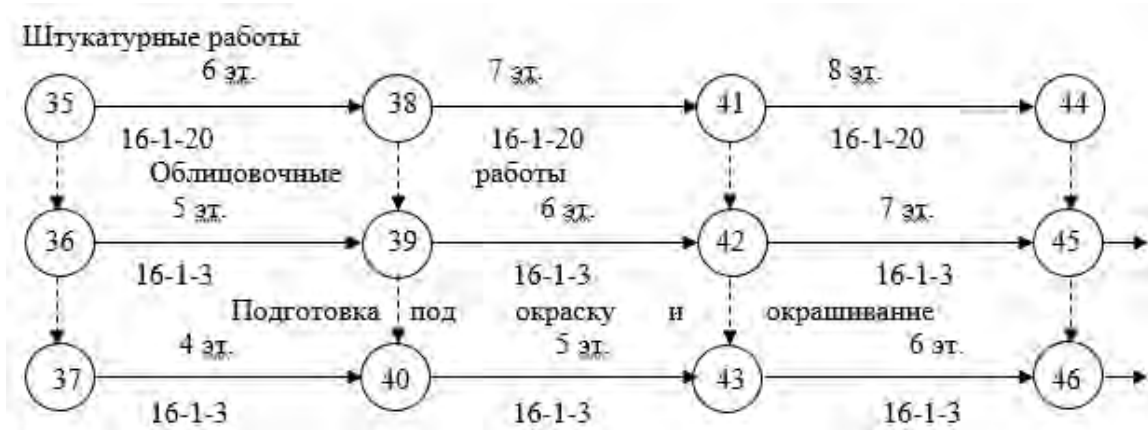


Рис. 1. Уравновешивание специализированного потока через продолжительность и оптимальный состав рабочих бригад последующих потоков

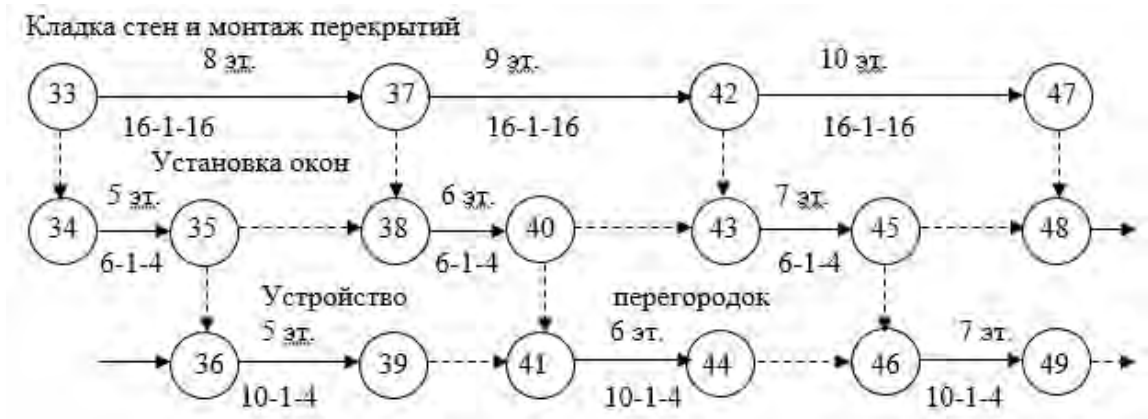


Рис. 2. Уравновешивание специализированного потока через кратность последующих ритмов

Более интересным является второй метод, т. к. он ведет к сокращению продолжительности выполнения работ, однако есть ограничение – наличие возможности совмещения строительных профессий для обеспечения непрерывной и ритмичной работы строительных бригад.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 1.03.11–2023. Продолжительность строительства. Оптимальная продолжительность выполнения строительно-монтажных работ на объектах строительства. Порядок определения. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2023. – 73 с.
2. СН 1.03.04–2020. Организация строительного производства. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2021. – 43 с.

УДК 621.9

## ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

О. В. ГОЛУШКОВА, А. М. ГОЛУШКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одним из важнейших факторов развития города и комфортного проживания в нем жителей является степень функционирования транспортной инфраструктуры.

Основными элементами транспортной инфраструктуры города Могилева являются дорожная сеть, общественный транспорт, велосипедная инфраструктура, пешеходная инфраструктура, парковки и паркинги.

Была проведена экспертная оценка значимости элементов транспортной инфраструктуры. Результат опроса экспертов, полученный при обработке анкет с рассчитанным весовым коэффициентом, представлен в табл. 1.

Табл. 1. Значимость элементов транспортной инфраструктуры, влияющих на качество обслуживания населения

Наименование элемента	Весовой коэффициент $B_k$	Место элемента
Дорожная сеть		
Автодороги и улицы	0,201	I
Мосты	0,163	II
Эстакады	0,136	III
Общественный транспорт		
Автобусы	0,098	IV
Троллейбусы	0,076	VI
Электробусы	0,006	XII
Автомобили маршрутные категории М2	0,096	V
Остановочные пункты	0,052	VIII
Велосипедная инфраструктура		
Велосипедные дорожки	0,073	VII
Велопарковки	0,041	IX
Пешеходная инфраструктура		
Тротуары	0,031	X
Пешеходные зоны	0,027	XI
Итого	1,00	

Из таблицы видим, что основным значимым элементом, обеспечивающим хорошее функционирование транспортной инфраструктуры, является качество автодорог и улиц, а также наличие мостов и эстакад города. В дальнейшем для усовершенствования функционирования транспортной инфраструктуры требуется оценить уровень развития дорожной сети города путем определения плотности и протяженности транспортной сети, прямолинейности транспортных линий, уровня обслуживания населения транспортными линиями.

УДК 69.059

## УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН СТАЛЬНЫМИ ОБОЙМАМИ БЕЗ ОБЕТОНИРОВАНИЯ

С. В. ДАНИЛОВ, Е. В. СЕМЕНЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Железобетонные сжатые элементы (колонны) воспринимают основные нагрузки и при этом обеспечивают устойчивость остова здания или сооружения, поэтому колонны относятся к конструктивным элементам повышенной ответственности. Выход из строя железобетонных колонн может привести к полному или частичному обрушению каркаса здания или сооружения.

Для воссоздания утраченных в процессе эксплуатации требуемых качеств железобетонных сжатых элементов (колонн) используют различные технические решения: ремонтно-восстановительные мероприятия с использованием бетонных составов; устройство обойм с применением бетона и дополнительного армирования; двухстороннее набетонирование сечения элемента; усиление стальными обоймами без применения бетона и с обетонированием стальных элементов обойм усиления.

Для дальнейших исследований выбран один из базовых способов усиления железобетонных сжатых элементов (колонн) стальными обоймами без применения бетона. Для данного способа существует проблема включения усиливаемой железобетонной колонны в совместную работу с конструкцией усиления.

Схема усиления железобетонного сжатого элемента (колонны) стальной обоймой без применения бетона приведена на рис. 1.

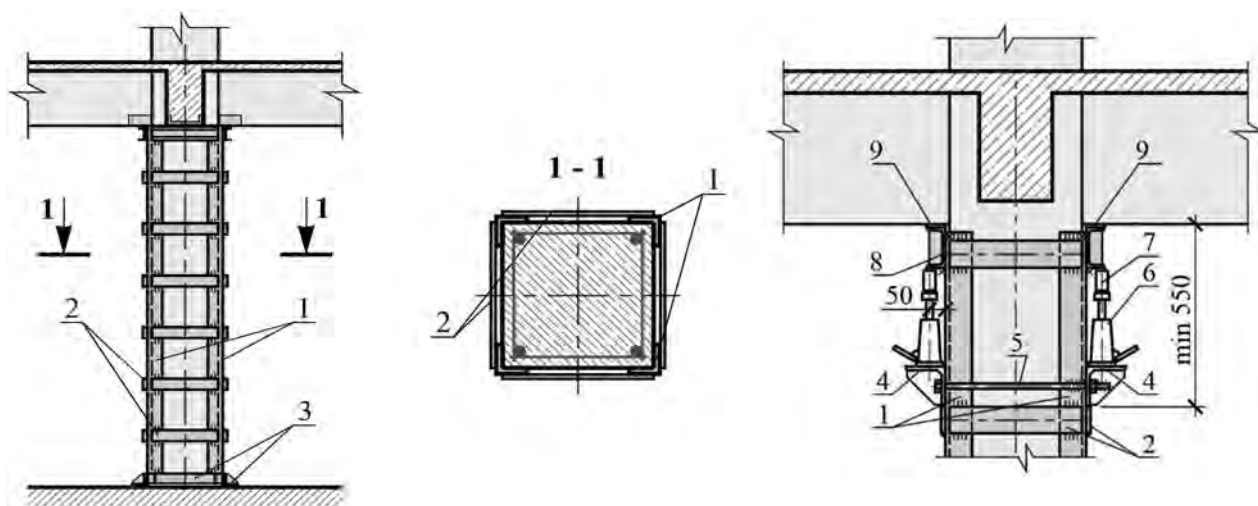


Рис. 1. Схема стальной обоймы без применения бетона: 1 – прокатные уголки; 2 – поперечные пластины; 3 – опорные элементы; 4 – временный опорный столик; 5 – стяжной болт временного столика; 6 – домкрат для создания предварительного напряжения; 7 – динамометр; 8 – упорный элемент (швеллер); 9 – неопреновая прокладка

Наиболее технически сложным и трудоемким является устройство оголовка конструкции усиления. Прокатные продольные уголки стальной обоймы включают в единую работу со сжатым элементом (колонной) вручную, с применением гидравлических либо механических (винтовых) домкратов.

В изысканиях был исследован домкрат с гидравлическим принципом действия, т. к. он имеет множество положительных сторон по сравнению с механическим (винтовым): незначительные трудозатраты при монтаже; плавность перемещения рабочего поршня; компактность конструкции. Домкраты монтируют на специальные временные опоры (столики), закрепленные к стальным прокатным уголкам. Домкраты фиксируют к конструкции перекрытия через стальные прокладки и при достижении необходимого предварительного напряжения закрепляют.

Для усиливаемых железобетонных колонн разного сечения –  $300 \times 300$ ,  $400 \times 400$  и  $500 \times 500$  мм – и высотой 3,6 м проведены аналитические исследования по следующим технико-экономическим показателям: масса всех элементов стальной обоймы, трудозатраты на производство работ, стоимость элементов стальной конструкции (в ценах 2023 г.) (рис. 2).

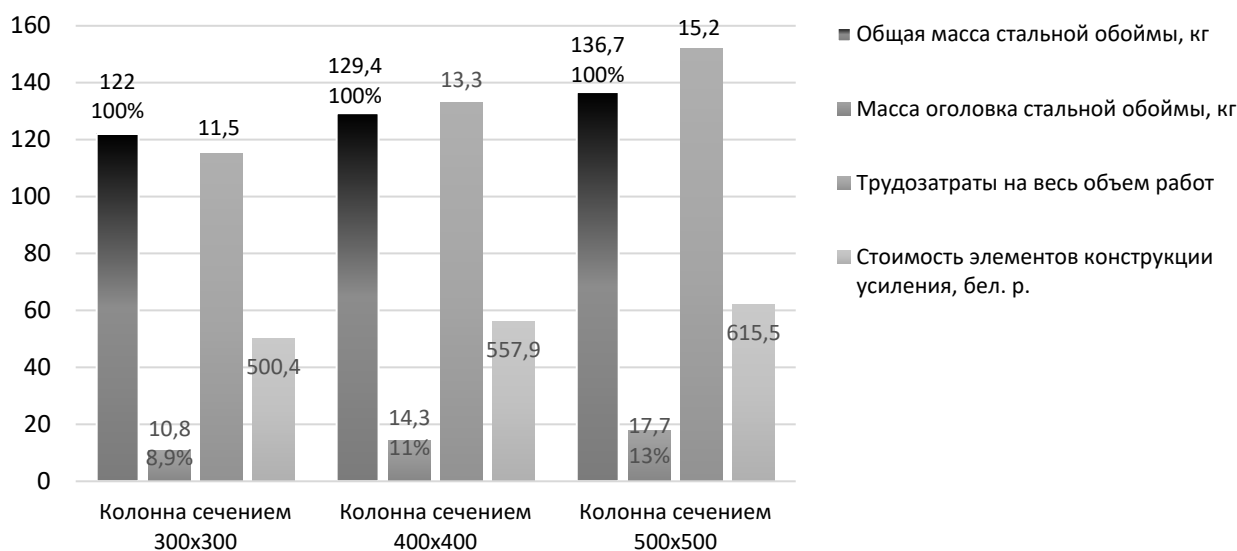


Рис. 2. Сравнение технико-экономических показателей усиления железобетонных колонн разного сечения стальной обоймой без применения бетона

Выполненные аналитические исследования показали, что в зависимости от сечения железобетонной колонны: масса оголовка стальной обоймы составляет 8,9 %...13 % от общей массы стальной обоймы усиления; затраты труда на устройство оголовка усиления составляют 27,2 %...35 % от трудовых затрат на все усиление стальной обоймы; затраты на устройства оголовка стальной обоймы составляют 12,7 %...17 % от общих затрат на выполнение усиления железобетонного сжатого элемента (колонны) стальной обоймой. Результаты проведенных исследований показали необходимость совершенствования технических решений по включению в совместную работу усиливаемой железобетонной колонны и стальной обоймы усиления.

УДК 624.072

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ УПРУГОГО СЛОЯ ОСНОВАНИЯ ВИНКЛЕРА НА ПАРАМЕТРЫ СЕРИЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ПЛИТ ОДНОПОЛОСОВОГО ПОКРЫТИЯ

О. В. КОЗУНОВА<sup>1</sup>, В. А. ДУДОРГА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь

<sup>2</sup> Филиал Белорусского национального технического университета  
«Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
по менеджменту и развитию персонала»  
Минск, Беларусь

Расчет серийных плит дорожного однополосового покрытия до настоящего времени не исследован в полном объеме. Дорожными плитами являются железобетонные конструкции, которые получили обширное применение в устройстве дорожных покрытий. Способность дорожных плит выдерживать большие нагрузки и привело к повсеместному использованию плит в качестве устройства постоянных и временных дорог.

В зависимости от назначения изделий, а также их характеристик, выделяют несколько видов дорожных плит: ПАГ (плита аэродромная гладкая), ПДП (плита дорожного покрытия), ПДН (плиты дорожные напряженные). Плиты ПАГ предназначены для устройства покрытия временных дорог или автостоянок, где используется транспорт высокой тоннажности, плиты ПАГ применяются для строительства аэродромов, а также обладают рифленным покрытием и высокой нагрузочной способностью. Плиты ПДН являются более распространенными, они предназначаются для обустройства дорог со средней нагрузкой и подходят как для временных, так и для постоянных дорог с возможностью разборки и сборки повторно. Плиты с маркировкой ПДН преобладают более высокой износостойкостью и прочностью, благодаря более качественному бетону, которым заливается стальная арматура, находящаяся под напряжением.

*Постановка задачи. Алгоритм решения.* В работе предлагается общий подход для расчета шарнирно-соединенных серийных плит (рис. 1) на основании Винклера, который основан на смешанном методе строительной механики и способе Б. Н. Жемочкина, позволяющий рассчитывать шарнирно-соединенные балки или плиты любой жесткости и формы на различных моделях упругого основания на произвольную вертикальную нагрузку.

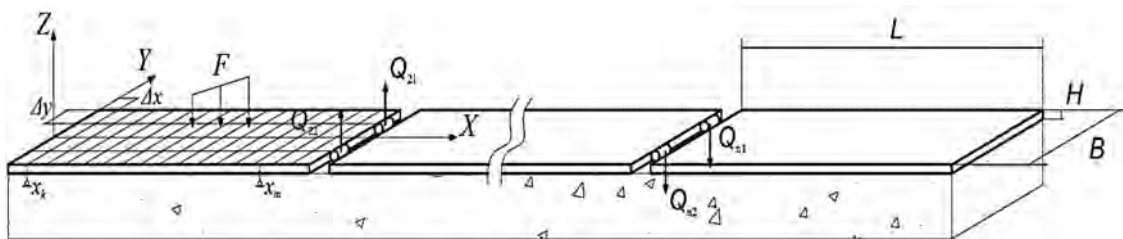


Рис. 1. Дорожное однополосное покрытие из шарнирно-соединенных плит

Рассмотрим систему из  $N_p$  шарнирно-соединенных в двух точках жестких прямоугольных плит на основании Винклера под действием внешней нагрузки.

Разобьем каждую плиту на одинаковые прямоугольные участки размерами  $\Delta x \times \Delta y$  и в центре каждого участка разместим вертикальную связь, через которую осуществляется контакт плиты с упругим основанием. Будем считать, что усилие в связи вызывает равномерную эпюру давлений в пределах участка. Таким образом, полученную статически неопределимую систему решим смешанным методом строительной механики, принимая за неизвестные усилия в связях линейные и угловые перемещения защемлений в центре каждой плиты и поперечные силы в соединительных шарнирах.

*Результаты расчета.* Расчеты выполнялись для системы из трех шарнирно-соединенных дорожных серийных плит размером  $6 \times 2 \times 0,14$  м из тяжелого бетона на основании Винклера со следующими характеристиками упругого слоя:  $E_0 = 15$  МПа;  $\nu_0 = 0,25$ ;  $h_0$  – переменная.

Внешняя нагрузка  $R = 30$  кН распределена по площади и приложена в центре каждой плиты. Собственный вес плиты – 3,48 кН. Принята разбивка каждой плиты на  $12 \times 4$  равных прямоугольных участков.

По формуле определяется коэффициент постели, который после подстановки исходных упругих параметров примет следующий вид:

$$K = \frac{E_0(1-\nu_0)}{(1+\nu_0)(1-2\nu_0)h_0} = 9 \text{ МПа/м}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – модуль упругости;  $\nu_0$  – коэффициент Пуассона;  $h_0$  – толщина слоя.

Результаты расчета получены в компьютерной среде Mathematica и программном комплексе ЛИРА САПР. Осадки центральных плит представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчета

Толщина упругого слоя, м	Осадки центральных плит, мм
0,25	5,8
0,5	5,57
1	5,05
2	3,14

В работе получила развитие методика статического расчета системы шарнирно-соединенного дорожного покрытия из серийных плит типа ПАГ на упругом слое основания Винклера дискретно переменной толщины. Результаты расчета свидетельствуют о обратной зависимости осадок дорожных конструкций на упругом основании от толщины упругого слоя при моделировании упругим слоем основания Винклера, что отличительно от прямой зависимости при послойном суммировании и объяснимо различной распределительной способностью грунта при соответствующем моделировании.

УДК 693.54

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИРПИЧНОГО ЛОМА В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Е. Е. КОРБУТ, О. Ю. МАРКО, А. В. РАГУЛЕВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Кирпичный лом, также известный как кирпичный бой или битый кирпич, представляет собой продукт, полученный в результате сноса старых кирпичных зданий или разрушения кирпичей на специальных дробилках. Кирпичный бой состоит из кусков кирпича разных размеров, от крупных фрагментов до мелкой крошки.

Использование кирпичного лома в качестве заполнителя при производстве бетонных изделий предоставляет ряд преимуществ:

- экономия средств: кирпичный лом значительно дешевле других традиционных заполнителей, таких как гравий или щебень. Это позволяет снизить общую стоимость бетона, что особенно важно при масштабных строительных проектах;

- улучшение свойств бетона: добавление кирпичного лома может улучшить характеристики бетона, такие как прочность, износостойкость, морозостойкость и водонепроницаемость. Это происходит благодаря тому, что кирпичный бой заполняет пустоты между частицами цемента, увеличивая общую плотность бетона;

- экологичность: кирпичный бой является экологически чистым продуктом, поскольку он производится из старого кирпича, который в противном случае был бы выброшен или загрязнял окружающую среду. Таким образом, использование кирпичного боя способствует сокращению отходов и улучшению экологической ситуации;

- разнообразие применения: кирпичный лом может использоваться в различных областях строительства, включая производство бетонных блоков, тротуарной плитки, бордюров, элементов ландшафтного дизайна и т. д. Это делает его универсальным и многофункциональным материалом.

С целью изучения возможности и эффективности использования кирпичного лома (боя) в производстве бетонных изделий поставлены следующие задачи исследования:

- обзор существующих технологий и практик использования кирпичного боя в бетонном производстве;

- анализ преимуществ и недостатков использования кирпичного боя по сравнению с другими заполнителями;

- изучение влияния различных пропорций кирпичного боя на свойства бетонных изделий (прочность, износостойкость, водостойкость и т. д.);

- оценка экономической эффективности использования кирпичного боя в сравнении с другими видами заполнителей.



УДК 624.05

## КОНВЕЙЕР ДЛЯ МОНТАЖА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Р. В. КОТКОВ, А. А. МОРОЗ, В. В. МОЛОДИН

Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
Новосибирск, Россия

*Современные виды ограждающих конструкций* по степени готовности делятся на два вида: состоящие из отдельных элементов (100 % работ по сборке фасада выполняются на строительной площадке) и готовых элементов (модулей), которые привозят на строительную площадку полной заводской сборки. На строительной площадке остается только поднять и закрепить модули в проектное положение. Как правило, устройства ограждающих конструкций производится только снаружи здания. Для этого использовали различные приспособления: строительные леса, фасадные подъемники.

При устройстве фасадов из модульных элементов все работы по закреплению элементов выполняются изнутри здания. Модульные элементы поднимают на монтажный горизонт грузоподъемными механизмами: снаружи здания краном или лебедкой в «свободно» подвешенном состоянии или мачтовыми подъемниками и лифтами до междуэтажного перекрытия (по жестким направляющим), далее развозятся к месту монтажа.

В обоих случаях присутствует фаза, когда модульный элемент находится в состоянии, когда модуль «свободно» подвешен на тросе. В этот момент на него оказывает сильное влияние ветер, наведение его на место монтажа возможно только оттяжками, что осложняется архитектурой, высотой здания, природными и другими воздействиями.

Стоит отметить, что *современные методы имеют существенные недостатки*: ограничение по высоте стройприспособлений (леса, люльки – по СНиП не более 100...120 м); особенности технологий (габаритность и вес элементов, длительный подъем, холостой ход); зависимость от погодных-климатических условий (осадки, ветер, в том числе вероятностные – ураганы, тайфуны, резкий перепад температуры и др.).

Рассмотрим общую схему монтажа СПОК ВЗ, она сводится к следующему.

Анализируя технологическую схему монтажа, видим наличие двух технологических простоев (в ожидании поднимаемого элемента и «холостого» хода), а также зависимость от высоты здания и скорости грузоподъемных механизмов.

Для совершенствования технологии монтажа ОК ВЗ были определены:

- **множество факторов**, влияющих на темпы монтажа ОК ВЗ – 21 шт.;
- в результате проведения исследования методом априорного ранжирования **группа факторов**, оказывающих наибольшее влияние на скорость монтажа ОК ВЗ – 9 шт.

При дальнейшем анализе, группируя факторы по смыслу и качеству, были определены три **направления совершенствования** технологии монтажа ОК ВЗ и предложены следующие технические решения:

1. Конструктивная безопасность ОК → Совершенствование конструктивных решений ОК → Устройство ОК из модулей максимально возможного размера (ДЖАМБО – размера 6000 × 3000 мм) → получен патент.

2. Безопасность при подъеме → Ограничение степеней свободы поднимаемого элемента → Использование при подъеме жестких направляющих → получен патент.

3. Схема подъема → Изменение принципиальной схемы подъема элементов → Конвейерный метод монтажа → получен патент.

Объединяя эти технические решения, получаем рабочую гипотезу.

***При монтаже СПОК для подъема элементов организуется «жесткая» транспортная магистраль, из частей самого здания, которые также служат элементами крепления ограждающих конструкций.***

Это позволит:

– создать монтажный конвейер, т. е. наладить непрерывную подачу монтажных элементов в зону их установки и тем самым увеличить темп монтажных работ;

– трансформировать свободный монтаж в принудительный (одна степень свободы монтажного элемента) и тем самым ликвидировать природно-климатические и техногенные риски повреждения монтажных элементов при подъеме и монтаже;

– изменение принципиальной схемы выполнения работ исключит влияние высоты на подъем и монтаж СПОК.

*Технически конвейерная технология решается следующим образом.*

1. На основные несущие конструкции устанавливаются кронштейны.

2. К кронштейнам закрепляются направляющие профили.

3. На верхнем этаже устанавливается лебедка, к тросу которой закреплена подъемная платформа. Далее, как по рельсам, платформа поднимает модуль на монтажный горизонт.

4. На монтажном горизонте модуль закрепляется к направляющим профилям, которые являются частью здания. (Каждый модульный элемент с внутренней стороны имеет крепежный уголок, с помощью которого он закрепляется к направляющим профилям.)

Контролируемый подъем (нахождение СПОК на жестких направляющих во время подъема) создаст положительные факторы:

– возможность одновременного подъема нескольких элементов;

– дополнительная страховка (т. к. поднимаемый элемент закреплен на тросе и направляющих одновременно);

– удержание СПОК во время подъема за жесткие магистрали, исключит влияние парусности, соответственно, погодных и техногенных факторов.

УДК 624.01.007

## ОСОБЕННОСТИ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА

Л. В. КУРНОСЕНКО, В. А. КАТКОВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Сравнительная эффективность хозяйственно-технической деятельности строительных организаций на всех уровнях управления строительным производством устанавливается по минимуму приведенных затрат. Одним из факторов производства, учитываемых при выработке решений в системе комплексной оптимизации процессов строительства и оказывающих влияние на их величину, является продолжительность строительства. Анализ способов определения затрат показал, что методики расчета изменений затрат в зависимости от этого фактора недостаточно. Требуется получение методологии, удобной для исследования и одновременно достаточно полно отражающей влияние на приведенные затраты всего множества факторов, зависящих от продолжительности строительства, а также учитывающей особенности каждого уровня управления.

При разработке такой методики необходим следующий подход.

1. Так как при выборе рациональных вариантов наиболее важным является не абсолютная, а относительная эффективность вариантов, в составе приведенных затрат допустимо учитывать лишь статьи и элементы издержек, изменяющиеся в зависимости от сроков строительства.

2. Приведенные затраты по сравниваемым организационно-технологическим решениям, различающимся по продолжительности их осуществления, рассчитываются суммированием этих затрат по каждой статье.

3. Для выбора альтернатив приведенные затраты по каждой статье рассчитываются как функция продолжительности работ, путем выведения математической формулы, в которой продолжительность является аргументом, а приведенные затраты – функцией.

Таким образом, для получения зависимости между величиной приведенных затрат и продолжительностью работ (строительства), пригодной для целей выбора оптимальных решений, необходимо:

– выявить статьи и элементы расходов, зависящие от сроков выполнения строительных работ;

– вывести и использовать выражение, связывающее издержки по каждой статье (элементу) с продолжительностью работ, для определения зависимости общих приведенных затрат от продолжительности для конкретного строительного процесса и строительства в целом.

Выбор оптимального варианта организации производства на объекте с учетом зависимости приведенных затрат от продолжительности работ должен основываться на анализе сетевой модели возведения объекта в целом [1]. При этом необходимо учитывать, что объект может иметь или нет заданную продолжительность строительства. В первом случае оптимальной будет продолжительность

строительства, при которой приведенные затраты достигают минимальной величины. Во втором случае оптимум будет соответствовать такой организации работ, при которой строительство объекта заканчивается в срок, не превышающий заданный, а приведенные затраты достигают минимально возможного значения. С математической точки зрения эту задачу можно сформулировать в следующем виде. Задана сетевая модель комплекса работ  $G = (I, J)$ , где  $I$  – множество событий  $i$ ;  $J$  – множество работ  $j$ . Для каждой работы известны пределы изменения продолжительности от минимальной  $t_{\min}$  до максимальной  $t_{\max}$ . Известны также зависимости между продолжительностью выполнения каждой из работ  $t_{i,j}$  и приведенными затратами на ее выполнение  $Z_{i,j}$ :

$$Z_{i,j} = f(t_{i,j}).$$

Конкретный вид функции  $f(t_{i,j})$  определяется видом работы с условием ее выполнения (намеченными способами производства работ, наличными ресурсами и т. п.).

Требуется установить:

– продолжительность выполнения каждой работы из  $t_{i,j}$  и общую продолжительность критического пути  $t_{кр}$ , при которой приведенные затраты на выполнение всего комплекса работ будут минимальными (если продолжительность строительства объекта не задана):

$$\sum_{i=1}^n Z_{i,j} \rightarrow \min; \quad t_{кр} = ?;$$

– продолжительность каждой работы  $t_{i,j}$ , при которой критический путь  $t_{кр}$  не превышал нормативную продолжительность строительства  $t_n$ , приведенные затраты на выполнение всего комплекса работ будут минимальными (при заданной продолжительности объекта):

$$t_{кр} \leq t_n; \quad \sum_{i=1}^n Z_{i,j} \rightarrow \min.$$

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курносенко, Л. В. Выбор рационального варианта организации производства работ на объекте на основе анализа сетевой модели / Л. В. Курносенко, Н. В. Клименкова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 104–105.

УДК 69.04

## КОНСТРУИРОВАНИЕ УЗЛА РЕШЕТЧАТОЙ СИСТЕМЫ

Т. С. ЛАТУН

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Решетчатые конструкции широко распространены в строительной отрасли, это обусловливается их незначительной массой при достаточно больших пролетах. В плоских решетчатых конструкциях, таких как ферма, для соединения стержней часто используют промежуточные элементы, в частности косынки.

При рассмотрении известных узловых соединений ферм [1] был выявлен недостаток, связанный с наличием дополнительных напряжений. Данный недостаток обусловлен несовпадением осей центров тяжести соединяемых элементов. Например, в сварном соединении, содержащем уголок и косынку, центр тяжести сечения уголка не совпадает с центром тяжести сечения косынки. Это приводит к возникновению дополнительных напряжений от изгиба, которые суммируются с приложенными напряжениями, тем самым снижая прочность соединения в целом.

Для устранения этого вредного явления автором разработана новая конструкция соединения косынки с уголком. Основная идея этой конструкции заключается в том, что в ней соединяемые элементы (уголок и косынка) установлены соосно друг другу, т. е. их оси совпадают. Такое техническое решение полностью исключает образование изгибающего момента в соединении и тем самым избавляет его от дополнительных напряжений изгиба.

Примером использования предлагаемого решения является соединение уголка  $35 \times 35 \times 5$  мм и косынки толщиной 6 мм. Был проведен сравнительный конечно-элементный расчет этого варианта соединения с использованием программного комплекса *Solid Works Simulation*. Полученные результаты показали, что в предлагаемом варианте имеет место однородное поле нормальных напряжений как в сечении уголка, так и в сечении косынки. Благодаря этому, отмечено снижение общего уровня максимальных нормальных напряжений в 1,4 раза по сравнению с традиционным подходом.

Предлагаемое решение по конструированию узлов может найти широкое применение при проектировании и изготовлении решетчатых конструкций. Такая конструкция узла решетчатой системы не требует сложного технологического процесса и в то же время позволяет существенным образом повысить его прочность.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: учебное пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – Москва : Высшая школа, 1982. – 272 с.

УДК 666.9-4

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТЕНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГИПСА С ПРИМЕНЕНИЕМ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Т. С. ЛАТУН, А. С. СИВУХА, А. С. МАРЧЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Огнестойкость, низкая звукопроводность и экологичность – характеристики, которыми должны обладать стеновые изделия. Стеновые изделия на основе гипса обладают всеми вышеперечисленными свойствами. Кроме того, поверхность, полученная из гипсовых стеновых изделий, пригодна для любого вида внутренней отделки: окраска, оклейка обоями, облицовка керамической плиткой. Технология монтажа перегородочных гипсовых блоков достаточно простая, что существенно влияет на сроки монтажа. Имеется возможность возведения разграничительных стенок любой конфигурации, которая достигается за счет легкости нарезки плит любой формы пилой-ножовкой.

Стоимость стенового блока, изготовленного на основе гипса и пластифицирующих добавок, достаточно высокая, для её снижения авторами предлагается частично заменить гипсовое вяжущее строительными отходами.

В современном мире вопрос утилизации отходов стоит достаточно остро. Это связано как с экономическими показателями, так и с сохранением экологии на всей планете. В ряде стран разработаны специальные программы по сортировке и дальнейшей переработке мусора, Республика Беларусь не является исключением. Разработан классификатор строительных отходов, согласно которому одним их типов безопасных строительных отходов является битый керамический кирпич. Безопасность данного продукта позволяет применять его при изготовлении материалов для жилых помещений без вреда для людей.

Используя отходы различных типов, можно не только воздействовать на физические свойства изделий, изготовленных с их применением, но и существенно экономить на стоимости сырья. Битый кирпич, который появляется при демонтаже зданий и сооружений либо при выполнении строительных работ, стоит примерно 3 р. за тонну, тогда как цена на гипс варьируется от 70 к. до 1,5 р. за 1 кг. Применение битого кирпича в качестве наполнителя при изготовлении стеновых блоков позволяет существенно экономить на гипсовом вяжущем.

Изготовленная серия образцов с применением боя керамического кирпича в количестве 50 % от массы вяжущего при испытании показала незначительное снижение предела прочности при сжатии. Показатель прочности изменился на 4,22 %, при этом экономия от такой замены вяжущего отходами на 1 м<sup>3</sup> составляет 252,9 р.

Полученный состав с применением битого кирпича можно применять для изготовления межкомнатных перегородочных блоков.

УДК 697.93

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ

О. М. ЛОБИКОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Для обеспечения требуемого нормами проектирования микроклимата чистых помещений необходимо исключить проникновение загрязнений в помещение. Реализация данного требования производится в ряде случаев за счет создания и поддержания в чистом помещении избыточного давления. При проектировании таких объектов определяется оптимальная комбинация проектных решений ограждающих конструкций для создания герметичного объема и систем обеспечения микроклимата внутри помещения и поддержания избыточного давления. При эксплуатации вентиляционных установок с рекуператором на выходе из него происходит выпадение конденсата на стенках воздуховодов, обледенение их в зимний период и, как следствие, повышение расходов на электроэнергию в период эксплуатации и отказы в работе оборудования. Необходимы наличие и безотказная работа системы удаления конденсата, а для ее проектирования, в свою очередь, необходимы достоверные исходные данные.

Зависимости расхода конденсата от относительной влажности и температуры удаляемого воздуха определены в [1]. Для проектирования такой системы для помещений с избыточным давлением с целью автоматизации расчетов с использованием Microsoft Office Excel выполнена аппроксимация результатов исследования и получены полиномы, которые дают возможность определить зависимость максимальной влажности  $\varphi_u$ , мг/кг, для диапазона температур  $T_p$  от  $-60$  °С до  $0$  °С ( $213,15...273,15$  К) и диапазонов избыточного давления воздуха от  $0$  до  $1,6$  МПа (табл. 1).

Табл. 1. Предельное содержание водяных паров

Избыточное давление, МПа	Полином 4-й степени
0	$\varphi_u = 0,0024 T_p^4 - 0,3397 T_p^3 + 17,591 T_p^2 - 320,02 T_p + 1391,2$
0,14	$\varphi_u = 0,0008 T_p^4 - 0,1082 T_p^3 + 5,3655 T_p^2 - 93,424 T_p + 393,72$
0,25	$\varphi_u = 0,0005 T_p^4 - 0,0654 T_p^3 + 3,1729 T_p^2 - 54,102 T_p + 225,85$
0,4	$\varphi_u = 0,0004 T_p^4 - 0,0454 T_p^3 + 2,2088 T_p^2 - 37,966 T_p + 160,26$
0,5	$\varphi_u = 0,0003 T_p^4 - 0,0406 T_p^3 + 2,0167 T_p^2 - 35,16 T_p + 149,14$
0,6	$\varphi_u = 0,0002 T_p^4 - 0,0263 T_p^3 + 1,1972 T_p^2 - 18,822 T_p + 73,382$
0,8	$\varphi_u = 0,0002 T_p^4 - 0,0263 T_p^3 + 1,3008 T_p^2 - 22,657 T_p + 96,37$
1	$\varphi_u = 0,0002 T_p^4 - 0,0214 T_p^3 + 1,0602 T_p^2 - 18,427 T_p + 78,062$
1,2	$\varphi_u = 0,0001 T_p^4 - 0,018 T_p^3 + 0,8887 T_p^2 - 15,411 T_p + 65,168$
1,6	$\varphi_u = 0,0001 T_p^4 - 0,0143 T_p^3 + 0,7199 T_p^2 - 12,737 T_p + 54,473$

Построены зависимости предельного содержания водяных паров для различных диапазонов избыточного давления (рис. 1).

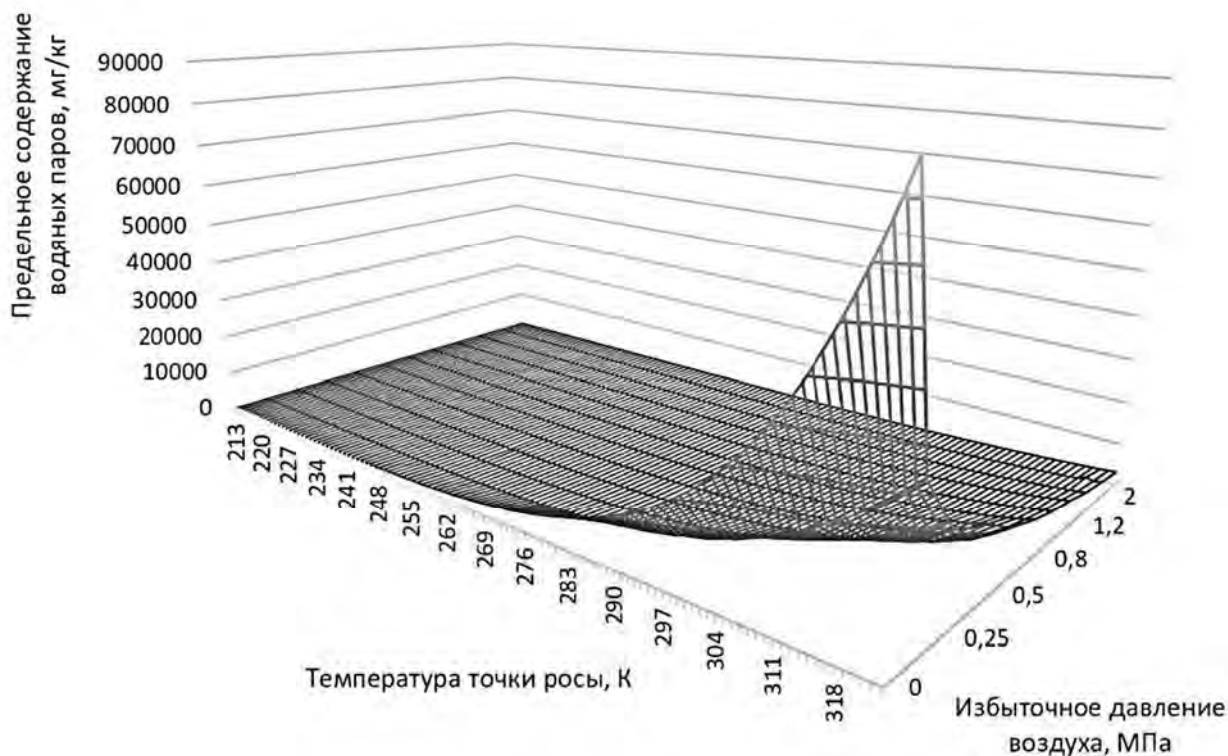


Рис. 1. Предельное содержание водяных паров в воздухе

При выполнении аппроксимации применили полином 4-го порядка с величиной достоверности 0,9998. Далее на основе полученных зависимостей предельного содержания водяных паров от температуры на выходе из рекуператора для различных значений перепадов давления возможно более точно определить объем и массу конденсата.

Данная методика позволяет определить автоматизированным способом максимально возможное содержание влаги в воздухе помещения в зависимости от избыточного давления и термодинамических условий работы вентиляционной установки. Полученные в результате аппроксимации зависимости дают возможность автоматизировать расчет исходных данных для проектирования вентиляционной установки с рекуператором для чистых помещений, опасных помещений и помещений с повышенной опасностью.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галюжин, С. Д.** Сравнительный анализ способов определения расхода конденсата в системе вентиляции машиностроительного предприятия / С. Д. Галюжин, О. М. Лобикова // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 7 (7). – С. 53–63.



УДК 66.092

## ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПОНЕНТОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ПРИ ЕЕ УТИЛИЗАЦИИ

Д. А. МАКАРЕНКОВ<sup>1</sup>, Л. А. СИВАЧЕНКО<sup>2</sup>, Л. Л. СОТНИК<sup>3</sup><sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»

Москва, Россия

<sup>2</sup> Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

<sup>3</sup> Барановичский государственный университет

Барановичи, Беларусь

Современное общество невозможно представить без устройств мобильной связи. В сравнении с 1990 и 2000 гг., когда устройство мобильной связи было роскошью, в сегодняшнем мире телефон воспринимается как неотъемлемая составляющая обихода. И все чаще встает вопрос переработки и утилизации используемых в устройствах аккумуляторных батарей.

В качестве аккумуляторов большинство современных устройств мобильной связи используют литий-ионные аккумуляторы, это обусловлено тем, что по сравнению с другими батареями они имеют самую высокую плотность энергии.

Энергетическая ценность литий-ионных аккумуляторов в основном определяется материалом катода. Наиболее распространенным вариантом является оксид лития-кобальта ( $\text{LiCoO}_2$ ) с плотностью энергии до  $180 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$ . Преимуществами литий-ионных аккумуляторов являются высокая плотность энергии и высокое рабочее напряжение. Несмотря на длительное время работы, жизненный цикл таких аккумуляторов ограничен [1], что приводит к увеличению образования опасных отходов (2-й класс опасности). В результате их хранения окружающая среда загрязняется опасными химическими веществами. К ним относятся: соединения кобальта (Co) и лития (Li); электролит, в том числе соли лития ( $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiBF}_4$  и  $\text{LiPF}_6$ ); органический растворитель, связующее поливинилденфторид и графит [2].

В то же время отходы литий-ионных аккумуляторов являются ценным техногенным сырьем, содержащим около 20 %...25 % Co, 3 %...4 % Li, 14,5 % Al и Cu в виде фольги, 16 % графита, 14 % полимеров, 24 % стали и 2,5 % электролита.

Проблемами переработки литий-ионных аккумуляторов занимается большое количество исследователей, однако большая часть исследований направлена на извлечение ценных компонентов в виде Co, Ni, Mn, Li, а переработка анодного материала, содержащего графит, практически не исследована.

Одним из перспективных направлений использования полученного графита является строительная отрасль, где широко используются графитовый и углеродистый кирпич. Графитовый кирпич обладает высокой термостойкостью и максимальной температурой. Он имеет высокую теплопроводность, малый коэффициент линейного расширения и хорошую термостойкость. При производстве графитового кирпича методом прессования используются

специальный мелкозернистый графит и антикоррозионные смолы. Его теплопроводность и электропроводность снижаются примерно на 30 %.

Известно, что углеродсодержащие компоненты, например, в углеродных кирпичах, можно частично заменить техническим углеродом (пироуглеродом), который можно получить пиролизом. В литературе представлена технология получения технического углерода из изношенных автомобильных покрышек, но не освещено производство технического углерода пиролизом из отходов литий-ионных аккумуляторов.

Предлагается рассмотреть процесс переработки анодных материалов литий-ионных аккумуляторов с целью получения из них графита и сажи методом пиролиза. Для подтверждения эффективности процесса переработки проведены экспериментальные исследования процесса разложения катодных и анодных материалов литий-ионных аккумуляторов по отдельности, а также их смеси путем пиролиза. При изучении кинетики и механизма пиролиза углеродсодержащих материалов был проведен анализ этого процесса и его характеристик, которые оценивали с помощью термогравиметрического и дифференциального термогравиметрического методов.

Характеристики пиролиза показывают, что органические вещества, содержащиеся в аккумуляторах, могут разлагаться при температуре пиролиза 500 °С для катодных материалов и 450 °С для анодных материалов. Впоследствии это приводит к более высокой эффективности извлечения ценных компонентов при более коротком времени измельчения. При разложении смеси материалов литий-ионных аккумуляторов удаляется большее количество органических компонентов, чем при пиролизе анодных и катодных материалов по отдельности. В этом случае скорость разложения смеси материалов происходит медленнее [2].

На основании экспериментальных исследований определены значения энергии активации материалов литий-ионных аккумуляторов после стадии пиролиза. Содержание компонентов в порошке, полученном после стадии пиролиза, определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты термических исследований позволяют рекомендовать режимные параметры процесса пиролиза аккумуляторов различных типов. При производстве графита и углеродистого кирпича вместо природного графита можно использовать углеродную сажу, полученную пиролизом.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lithium ion battery degradation: what you need to know / J. S. Edge [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2021. – № 23 (14). – P. 8200–8221.
2. Features of the pyrolysis process of waste batteries using carbon black as an additive in the construction industry / V. I. Nazarov [et al.] // *Construction Materials and Products*. – 2023. – № 6 (6). – P. 4.

## ПОЛУЧЕНИЕ КУБОВИДНОГО ЩЕБНЯ

А. С. МАРЧЕНКО, В. С. МИХАЛЬКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Щебень, получаемый из гранита, является основным составляющим для производства бетона, а также важным строительным элементом, используемым в дорожном строительстве. Подготовка щебня осуществляется его измельчением в различного рода дробильных установках. Поэтому необходимо и критически важно применять отрегулированные режимы и параметры процесса измельчения для получения качественного гранитного щебня. К основным конструктивным параметрам дробильных установок ударного действия относятся длина и диаметр ротора, число ударных элементов и их окружная скорость.

Одним из важных показателей качества гранитного щебня является максимальное содержание кубовидной фракции в общем объеме производимого щебня одновременно с минимальным количеством зерен щебня пластинчатой и лещадной формы. Особенно большое значение имеет форма зерен для мелких фракций гранитного щебня. Выполнение этих требований часто является решающим фактором при выборе конструкции и режимов работы дробильной установки.

Авторами проведены исследования процесса измельчения гранитного щебня месторождения «Микашевичи» на дробильной установке, разработанной под непосредственным руководством профессора Л. А. Сиваченко.

Дробильная установка ударного действия приведена на рис. 1.

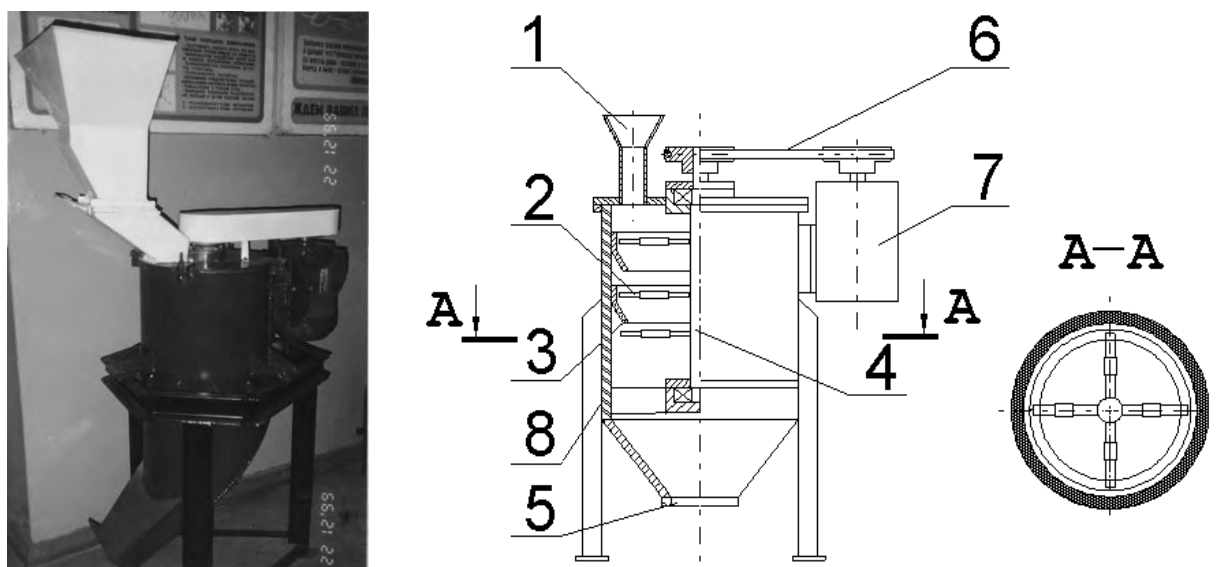


Рис. 1. Дробильная установка ударного действия и схема ее конструкции: 1 – загрузочный бункер; 2 – ударные элементы; 3 – отражатель; 4 – вертикальный вал; 5 – выпуск готовой продукции; 6 – ременная передача; 7 – электродвигатель; 8 – корпус

Конструкция дробильной установки представляет собой многоярусную дробилку ударного действия с вертикальным валом с закрепленными ярусно ударными элементами. Основные параметры экспериментальной установки и режимы проведения экспериментов определены на основании математической модели. При этом учитывалось, что конструкция дробильной установки ударного действия при проведении экспериментов должна обеспечивать возможность центрального удара при соприкосновении кусков щебня с билами, исключение прохода кусков гранитного щебня через зону действия ударных элементов без соударения, приложение импульса удара к рабочей поверхности ударных элементов. При проведении экспериментальных исследований на дробильной установке ударного действия частота вращения электродвигателя измерялась тахогенератором ТМГ-30У3 с пределом измерений до  $4 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ , погрешность не более  $0,5 \text{ мин}^{-1}$ . При этом зависимость частоты вращения приводного вала экспериментальной дробильной установки отслеживалась на вольтметре типа М2017 3-го класса точности. Частота вращения вертикального вала дробильной установки контролировалась с помощью механического тахометра ТМЗ-1П с приведенной погрешностью измерений не более пяти оборотов и вольтметра типа М2017. Тарирование частоты проводили плавно, изменяя частоту вращения ротора двигателя. Погрешность при определении частоты вращения в процентах определялась по формуле

$$\delta = \frac{n - n_{\partial}}{n_{en}} \cdot 100 \%,$$

где  $n$  – показания измерителя частоты вращения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $n_{\partial}$  – действительная частота вращения вертикального вала по механическому тахометру,  $\text{с}^{-1}$ ;  $n_{en}$  – верхний предел проверяемого диапазона,  $\text{с}^{-1}$ .

Погрешность измерений не превышала 3 %.

При определении фракционного состава исходного материала и измельченного щебня взвешивание и рассеивание частиц материала проводились по существующим методикам [1] и инструкции 4М1.778.095 ТО. Точность измерений и погрешности измерений определялись по методикам [2]. Средне-взвешенный диаметр частиц исследуемого материала определялся по методике [3]. Мощность, затрачиваемая при работе созданной установки, рассчитывалась по показаниям амперметра типа М2015 2-го класса точности и вольтметра типа М2017 3-го класса точности, подключенных в схему электропитания установок.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурин, Г. А. Технологические измерения / Г. А. Мурин. – Москва: Энергия, 1968. – 784 с.
2. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – Москва: Наука, 1971. – 192 с.
3. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – Москва: Недра, 1980. – 416 с.

УДК 621.926

## ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ГРАНИТНОГО ЩЕБНЯ НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ДРОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ДУК-1000

А. С. МАРЧЕНКО, Д. В. МИХАЛЬКОВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Под руководством профессора Л. А. Сиваченко была спроектирована и изготовлена промышленная дробильная установка ударного действия ДУК-1000 (рис. 1). В этой дробильной установке реализованы принципы разрушения гранитного щебня вращающимися стальными ударными элементами. При этом было обеспечено качество измельченных частиц. Расположение этих ударных элементов показано на рис. 2.

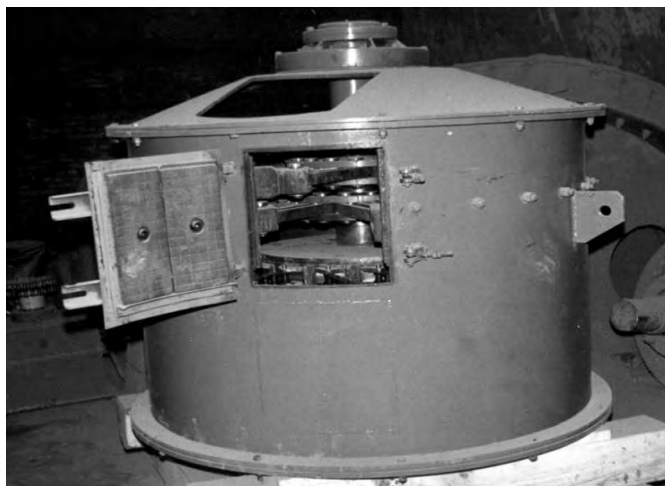


Рис. 1. Дробильная установка ударного действия ДУК-1000



Рис. 2. Расположение ударных элементов

**Технические характеристики дробильной установки ДУК-1000.**  
Двигатель – 4А250S6М200 (ГОСТ19523–74).  
Мощность установленного двигателя – 45 кВт.

Частота вращения вала электродвигателя – 1000 мин<sup>-1</sup>.

Частота вращения вала дробильной установки – 555 мин<sup>-1</sup>.

Производительность установки – 50 т/ч.

Габаритные размеры (без рамы) – 1746 × 1376 × 3115 мм.

Крупность загружаемого материала – 70 мм.

Линейная скорость ударных элементов изменялась при использовании шкивов трех типоразмеров, при этом линейная скорость ударных элементов изменялась от 30 до 60 м/с, частота вращения вертикального вала дробилки измерялась с помощью механического тахометра ТМЗ-1П (ГОСТ14916–69).

Для измерения размеров частиц щебня использовался набор сит «Физ-прибор» с размером ячеек 5, 10 и 20 мм и аналитические весы.

В качестве исследуемого материала использовали для измельчения гранитный щебень месторождения близ г. п. Микашевичи Брестской области.

Гранит относится к полнокристаллическим зернистым глубинным породам. Текстура массивная, однородная.

Содержание глинистых и пылевидных частиц – 0,1 %.

Содержание сернистых и сернокислых соединений – 0,03 %...0,89 %.

Истинная плотность колеблется от 2,79 до 2,83 г/см<sup>3</sup>.

Пористость – 1,11 %...1,38 %.

Водопоглощение – 0,03 %...0,35 %.

В процессе экспериментальных исследований установлены основные переменные факторы (скорость вращения ударных элементов, количество ударных элементов и их размещение по объему помольной камеры), которые влияют на процесс измельчения гранитного щебня и на производительность дробильной установки.

Для определения влияния основных факторов на процесс дробления щебня в помольной камере дробильной установки ударного действия воспользовались центральным композиционным ротатбельным планом типа  $B_n$  [1].

Выходными параметрами экспериментальных исследований назначены фракционный состав измельченного щебня, производительность дробильной установки и минимизация энергозатрат.

Эти показатели отвечают ряду требований, предъявляемых к параметрам оптимизации; универсальность, возможность выражения одним членом и представления в количественном виде [2].

Проведены также эксперименты по измельчению гранитного щебня месторождения «Волма». Физико-технические свойства полезного ископаемого: истинная плотность – 1,81 г/см<sup>3</sup>; содержание вредных примесей – 12,45 %; устойчивость структуры против распада – 1,9; радионуклиды – (85,1 ± 17,0) Бк/кг.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зедгенидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгенидзе. – Москва: Наука, 1976. – 390 с.
2. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание, 2013. – 584 с. : ил.

УДК 691.327.3

## К ВОПРОСУ О НОРМИРОВАНИИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

И. И. МЕЛЬЯНЦОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Исследования в области механики легких бетонов сводятся не только к изучению прочности и долговечности, но и деформативных характеристик.

Одним из базовых параметров, используемым для практической оценки диаграммы деформирования легкого бетона, является модуль упругости  $E_{lcm}$ . В нормах проектирования СП 5.03.01–2020 *Бетонные и железобетонные конструкции* он регламентируется как тангенс угла наклона секущей между точками  $\sigma_c = 0$  и  $\sigma_c = 0,4f_{lcm}$  диаграммы и определяется в зависимости от класса по прочности на сжатие и коэффициента  $\eta_E$ , учитывающим верхнее значение плотности для класса легкого бетона по плотности. Значение  $E_{lcm}$  в пределах одного класса может меняться в зависимости от класса бетонной смеси по консистенции и соответствующим маркам по удобоукладываемости. Таким образом, модуль упругости в нормах проектирования представляет собой функцию двух аргументов: прочности и плотности легкого бетона.

Исследования в области нормирования модуля упругости для легких бетонов в зависимости от прочности бетона и плотности проводились многими учеными. В частности, Г. Д. Цискрели и А. Б. Пирадов провели ряд исследований легких бетонов на различных заполнителях широкого диапазона прочности и плотности. Полученный ими большой разброс данных зависимости модуля упругости от прочности бетона не дал возможности описать их конкретной зависимостью.

Г. А. Бужевич также отмечал, что прямой пропорциональной зависимости между прочностью на сжатие и модулем упругости легких бетонов различных видов нет. В то же время у тяжелых бетонов модуль упругости скоррелирован с его прочностью. Доказано, что максимальные значения деформаций при разрушении возрастают в бетонах с низкими прочностными характеристиками.

У А. М. Невилля факторами, влияющими на модуль упругости тяжелого бетона, являются также количественное соотношение компонентов в смеси, характеристики заполнителя и плотность бетона. В легких же бетонах модуль упругости не зависит от модуля упругости цементной матрицы и соотношения компонентов в составе бетона.

Во многих источниках предложена обобщенная эмпирическая формула, устанавливающая зависимость модуля упругости легкого бетона  $E$  от кубиковой прочности на сжатие  $R$  и объемного веса бетона  $\gamma$ :

$$E = A \cdot \gamma^k \cdot \sqrt{R^n}, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $k$ ,  $n$  – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов у различных авторов варьируются в широких пределах. В каждом конкретном исследовании легкого бетона на пористом заполнителе различного вида должно быть произведено на основании статистической обработки достаточно большое количество опытных данных.

Более сложный подход к определению модуля упругости легкого бетона предложил Ю. И. Мешкаускас. Он описал модуль упругости как многофакторную функцию, включающая функцию, определяющую модуль упругости при условии фиксирования остальных факторов  $f(R, \gamma)$ , функцию фактора времени  $f(t)$  и функцию предыстории напряженного состояния бетона  $f(\tau, \eta)$ :

$$E = f(R, \gamma)f(t)f(\tau, \eta)m_1m_2m_3, \quad (2)$$

где  $m_1, m_2, m_3$  – коэффициенты, учитывающие условия твердения, влажности и уровень относительных напряжений.

Данный подход в определении модуля упругости учитывает механические и технологические факторы, но главная роль в данной зависимости отводится прочности бетона.

Расчет модуля упругости на основании прочности и плотности в проектировании легкобетонных конструкций дает хорошую сходимость с опытными данными для классов LC 12/13...LC 20/22. Остальные факторы ввиду своей малозначительности можно не учитывать. При увеличении же классов по прочности наблюдается достаточный разброс фактических данных, полученных из результатов испытания образцов. Данный разброс связан с концентрацией напряжений из-за разницы в значении модуля упругости заполнителя и растворной составляющей.

Существуют зависимости, описывающие модуль упругости бетона через модули упругости его компонентов, т. е. растворной составляющей и заполнителя. Значения модулей упругостей легкого бетона, полученные по экспериментальным исследованиям, тем больше отличаются от расчетных, чем больше разница между упругими характеристиками растворной матрицы и заполнителя.

В монографии И. А. Иванова подчеркивается роль отношения модуля упругости растворной составляющей к модулю упругости заполнителя  $E_p/E_z$ . Не опровергая значимости плотности и прочности бетона для нормирования модуля упругости легкого бетона, автор рекомендует при проектировании требуемого состава основываться на две составляющие: прочность крупного заполнителя, используемая не только для достижения определенного класса бетона по прочности, но и его долговечности, и соотношение  $E_p/E_z$ . Величина  $E_p/E_z$  рассматривается как критерий структуры и используется в математических моделях для описания упругих свойств, а также имеет тесную связь с механикой разрушения легкого бетона.



УДК 621.926

## ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕЛЬЧЕНИЮ ЩЕБНЯ НА ДРОБИЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

В. С. МИХАЛЬКОВ, Д. В. МИХАЛЬКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Производительность дробильной установки для измельчения гранитного щебня определяется по формуле

$$Q = A \cdot V_m \cdot \gamma_m \cdot k_3 \cdot k_Y \cdot k_Z, \quad (1)$$

где  $A$  – средняя площадь сечения материала, находящегося в камере дробильной установки;  $V_m$  – скорость движения исходного и конечного продукта в дробильной установке;  $\gamma_m$  – плотность дробимого материала;  $k_3$  – коэффициент заполнения материалом камеры дробильной установки;  $k_Y$  – коэффициент, учитывающий число ярусов ударных элементов дробилки;  $k_Z$  – коэффициент, учитывающий число ударных элементов на ярусе.

Скорость движения материала щебня в дробильной установке

$$V_m = \sqrt{3600 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot D_{cp}^2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)}. \quad (2)$$

Влияние количества ярусов бил на производительность дробилки (рис. 1) может быть оценено зависимостями, полученными экспериментальным путем.

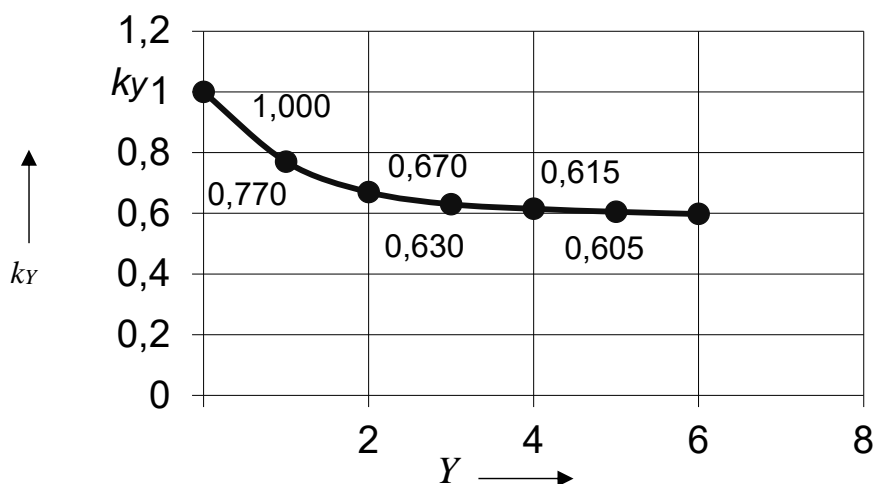


Рис. 1. График изменения коэффициента  $k_Y$  в зависимости от числа ярусов ударных элементов

График зависимости (см. рис. 1) получен для экспериментальной установки ДУК-400. Аналогичные результаты получены на дробильных установ-

ках ДУК-400 и ДУК-1000 соответственно. Эту зависимость в предварительных расчетах можно использовать для дробильных установок ДУК-700 и ДУК-1000.

Алгоритм решения задачи интерполяции целесообразно представить в виде следующей последовательности [1].

1. Выбор значимых критериев, а также их параметры изменения.
2. Определение модели регрессии.
3. Планирование эксперимента и его проведение.
4. Анализ результатов многофакторного эксперимента.
  - 4.1. Оценка функции отклика и определение их значимости.
  - 4.2. Расчет параметров в уравнении регрессии.
  - 4.3. Анализ значимости факторов.
  - 4.4. Оценка сходимости уравнения регрессии.

Систематические ошибки могут влиять на функцию отклика. Соответственно, планирование эксперимента осуществляем в произвольной последовательности [2]:

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^{k=4} b_j \cdot x_j + \sum_{j,i=1}^{k=4} c_j \cdot x_j \cdot x_i + \sum_{j=1}^{k=4} d_j \cdot x_j^2, \quad (3)$$

где  $Y$  – расчетное значение функции отклика;  $a_0$  – свободный член;  $b_j$  – коэффициент при линейной зависимости;  $c_j$ ,  $d_j$  – коэффициент при (квадратичном) парном взаимодействии факторов;  $x_j$ ,  $x_i$  – исследуемые независимые переменные.

Следует отметить, что экспериментальные исследования на дробильной установке проводились в случайной последовательности. Это необходимо для исключения ошибок, вызванных внешними условиями.

Коэффициент эластичности показал, что функция изменяется в зависимости от значения аргумента в процентном соотношении, при помощи которого была определена значимость факторов.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных уравнения регрессии адекватно описывают исследуемый процесс измельчения в варьируемых диапазонах.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лецкий, Э. К.** Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Э. К. Лецкий. – Минск: Мир, 1977. – 552 с.
2. **Красовский, Г. И.** Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск: БГУ, 1982. – 302 с.: ил.

УДК 658.62

## РЕЦИКЛИНГ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

А. Б. МОЙСЕЕНКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Экономия запасов природных ресурсов при строительстве и производстве строительных материалов является одной из насущных проблем в Республике Беларусь. Выходом из сложившейся ситуации может быть использование отходов при демонтаже, сносе и реконструкции зданий и сооружений.

Наиболее часто встречающимися отходами строительного производства являются отходы, возникающие при демонтаже железобетонных конструкций, кирпичный бой, отходы арматуры и древесины. К сожалению, они довольно часто утилизируются, их вывозят на свалки или полигоны, закапывают в землю. Это все негативно влияет на экологию и окружающую среду, не позволяет промышленности вторично использовать дорогостоящий строительный материал.

Рециклинг строительных отходов – это возможность повторной переработки отходов производства и рациональное использование невозполнимых природных ресурсов. Вторичная переработка строительных отходов снижает экологический ущерб от производственной деятельности, а для строительной отрасли это задача государственного уровня.

Ежегодно в Республике Беларусь образуется около 25 млн т отходов производств, доля строительных отходов составляет около 3,3 млн т (рис. 1).

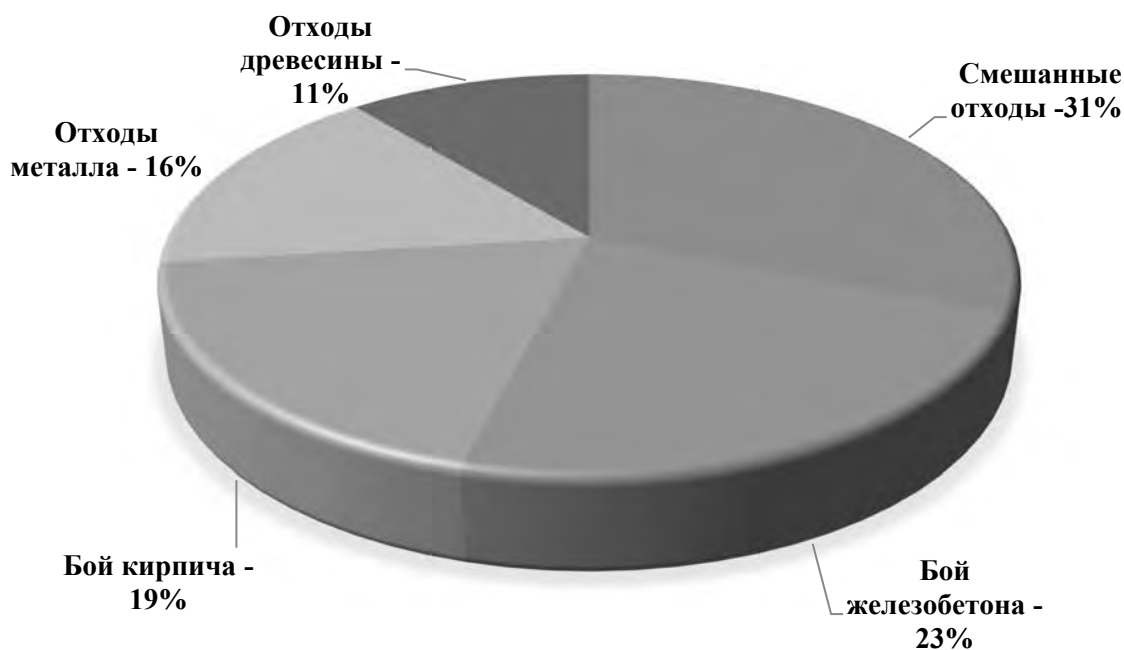


Рис. 1. Отходы строительного производства

В процессе строительной деятельности скапливается большое количество строительных отходов, часть вывозится в места временного захоронения, большая часть используется как вторичное сырьё, небольшой процент идет в биоразлагаемые отходы.

Согласно статистическим данным, в ходе строительства и после его завершения использование строительных отходов в Республике Беларусь возрастает. Динамика их использования по областям за период 2020–2023 гг. представлена на рис. 2. В реестре объектов по использованию строительных отходов зарегистрировано более 190 предприятий.

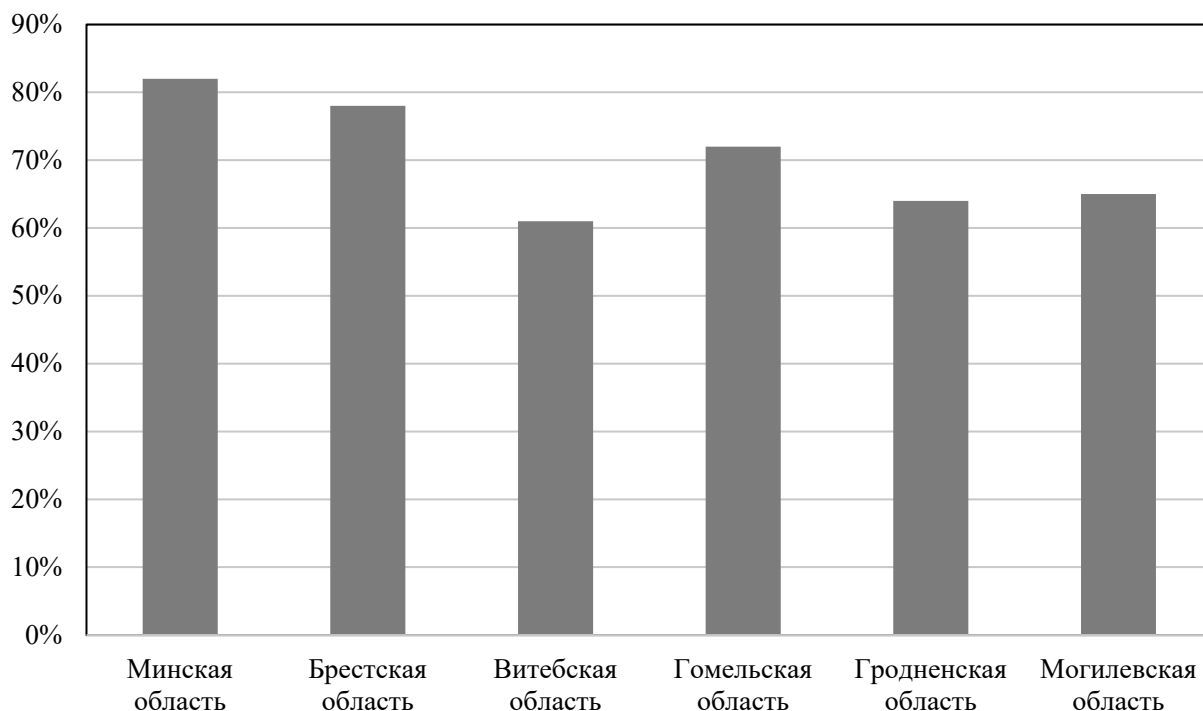


Рис. 2. Динамика использования строительных отходов за 2020–2023 гг.

Преимущества сбора и переработки строительных отходов отражается на:

- экономии топлива и электроэнергии для производства новых строительных материалов;
- рациональном использовании и максимальном сохранении природных ресурсов;
- уменьшении вредных воздействий на окружающую среду.

Таким образом, рециклинг строительных отходов способствует решению проблем утилизации и сокращению издержек на захоронение строительного мусора, а также уменьшает негативное воздействие на здоровье людей и способствует созданию новых рабочих мест.

Проблемы, возникающие при сборе и переработке отходов производства, необходимо решать комплексно, еще на стадии разработки проектной документации, при участии всех субъектов хозяйственной деятельности на научно обоснованном уровне.

УДК 693.547.3

## МЕТОД ГРУППОВОГО АНАЛИЗА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ

В. В. МОЛОДИН, Н. С. ВОЛКОВ, М. С. ПОПОВА

Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
Новосибирск, Россия

Строительство является уникальным техническим и технологическим процессом, включающим в себя множество подпроцессов, разделенных между собой последовательностью их выполнения. Возведение монолитной конструкции в зимний период является одним из них.

Однако, несмотря на все известные методы прогрева бетонной смеси при отрицательной температуре, строители сталкиваются с проблемой ненадлежащего ухода за бетонной смесью, залитой в опалубку, поскольку процесс гидратации напрямую зависит от температуры состава. К тому же, исходя из нормативной документации, раствор приобретает критическую прочность только при положительной температуре. Влияние отрицательной же способствует кристаллизации воды, находящейся в порах, и последующим недобору критической прочности, влекущее несоответствие готового изделия к эксплуатации и экономическим издержкам в связи с производственным браком, либо с передержкой при прогреве.

Советские и российские ученые активно пытались вывести формулы, позволяющие решить данную проблему путем вывода формул, описывающих процесс набора критической прочности бетонной смеси при заданных параметрах мощности и изменении негативных факторов окружающей среды, но все они обладали рядом неточностей, среди которых:

1) формула Б. Г. Скрамтаева [1] хоть и являлась наиболее рациональной и применимой, но при этом лишь приблизительно описывала данный процесс;

2) вывод теории регулярного режима Г. М. Кондратьева [2] не учитывала изменения температуры окружающей среды и позволяла решать три типа задач – пластинка, цилиндр и шар;

3) задача А. В. Лыкова [3] также не учитывала фактор изменчивости температуры среды;

4) решение В. В. Молодина с применением линейных дифференциальных уравнений теплопроводности линейно описывала данный процесс и была громоздкой, что не позволяло его применять в условиях реальных строительной площадки.

Однако, благодаря Л. В. Овсянникову, был получен принципиально новый метод [4], основанный на нелинейности процессов, происходящих в среде, в связи с чем Ю. А. Чиркунов предложил использовать групповой анализ дифференциальных уравнений в качестве инновационного пути решения поставленной задачи. Им выведены формулы, описывающие монолитные конструкции разного типа и сечения, среди которых были плита, колонна и ригель [5].

Полученные сведения в ходе экспериментального исследования подтвердили, что данный метод является не только применимым, но и актуальным в реалиях строительной площадки, поскольку данные формулы нелинейно описывали кривую нагрева и охлаждения бетонной смеси и, ввиду компактности, позволяют применять их в рамках строительной площадки.

В связи с изученными материалами определена основная цель исследования.

Целью проводимого исследования является оценка метода группового анализа дифференциальных уравнений с последующей реализацией его на строительных объектах Российской Федерации.

На основе полученного материала и поставленных целей проведены экспериментальные и теоретические исследования для выявления его потенциала.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Подмодели T1 и T10, описывающие нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла, дают хорошую сходимость.

2. Для случая малой мощности расчетные формулы дают наиболее точный результат.

3. Сравнительный анализ сходимостей двух графиков показал разницу в 2,6 %.

4. Метод группового анализа дифференциальных уравнений является эффективным в условиях зимнего бетонирования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные материалы / Б. Г. Скрамтаев [и др.]. – Москва, 1954.
2. **Кондратьев, Г. М.** Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – Москва, 1954.
3. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва, 1967.
4. **Овсянников, Л. В.** Групповой анализ дифференциальных уравнений / Л. В. Овсянников. – Москва, 1978.
5. Нелинейные подмодели, описывающие распределение тепла при зимнем бетонировании колонны при наличии внешнего нестационарного источника тепла / В. В. Молодин [и др.]. – Новосибирск, 2023.

УДК 693.547;691.535

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА АНКЕРНЫХ КРЕПЛЕНИЙ К БЕТОНУ

Г. А. НЕПОМНЯЩЕВ, В. В. МОЛОДИН

Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
Новосибирск, Россия

В строительной отрасли присутствует высокая потребность различных способов соединения конструктивных элементов и оборудования с бетонным (железобетонным) основанием, при которых бы обеспечивалась совместная работа всех этих элементов.

Таковыми способами являются различные технологии устройства анкерных креплений, среди которых выделяются замоноличиваемые и устанавливаемые в заранее просверливаемые отверстия.

Недостатки замоноличивания анкерных устройств следующие:

- сложность выверки;
- сложность сохранения положения в пространстве во время укладки бетонной смеси;
- невозможность использования в готовых бетонных конструкциях;
- возможное смещение изготовленных анкерных устройств во время выполнения других процессов.

В связи с этим исследования направлены на совершенствование технологии анкерных креплений, выполняемых в просверливаемые отверстия, которые могут выполняться по различным технологиям, в том числе с применением цементных растворов. Основным недостатком таких креплений, вклеиваемых на основе цементных составов, являются значительные сроки набора прочности. По этой причине данный способ, как правило, заменяется использованием различных химических составов, которые имеют высокую стоимость расходного сырья, что в дальнейшем при значительных объемах анкерных креплений приводит к удорожанию строительства в целом.

В связи с этим выявлены направления, позволяющие влиять на скорость набора прочности цементных композиций, а именно исследование различных методов повышения активности цемента, позволяющих не только сократить сроки набора требуемых прочностных показателей, но и повысить прочность на сжатие бетонных изделий в регламентируемые сроки.

Особый интерес вызвали методы электрофизической активации различных материалов, изучаемые еще в 30-х гг. XX в. Л. А. Юткиным [1]. В настоящее время изучением этих методов занимаются в ТГУ В. И. Курец [2], Б. В. Семкин [3], в ТГАСУ В. Н. Сафронов [4] и др. Вместе с тем, все вышеназванные исследователи использовали однофакторное электрофизическое воздействие на различные материалы и полученные ими величины прироста конечной прочности, как правило, укладывались в диапазон 15 %...35 % на водоцементных суспензиях и 10 %...30 % на бетонах.

Целью проводимого исследования является сокращение сроков набора прочностных показателей анкерных креплений к бетону.

На основе изученного материала и поставленных целей разработан метод устройства анкерных креплений с применением электрогидравлического эффекта [5], создана лабораторная установка [5], на которой проведены экспериментальные исследования.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Выявлено положительное влияние электрогидравлического эффекта на цемент, содержащий раствор, а именно взрывной рост прочностных показателей, повышение сцепления нового цементного камня и базового материала (бетонной конструкции).

2. Выявлено повышение прочностных показателей образцов цементного камня, выполненного на основе подвергшейся электрогидравлическому эффекту водоцементной суспензии, повышение составляет до 1,5 раз в возрасте 1 сут, что приводит к гораздо быстрому набору прочностных показателей анкерных креплений к бетону, выполненных на основе цементно-песчаного раствора.

3. Выявлено сокращение времени начала схватывания цементсодержащего раствора.

4. Установлено, что применение электрогидравлического эффекта в технологии устройства анкерных креплений в бетоне имеет высокий потенциал развития, в связи с возможностью значительного сокращения сроков выдерживания анкерных узлов до монтажа основных конструкций, по сравнению со стандартными технологиями.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Юткин, Л. А.** Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 253 с.
2. Активация цементных растворов электрическими разрядами / В. И. Курец [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 1. – С. 76–80.
3. **Семкин, Б. В.** Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б. В. Семкин, А. Ф. Усов, В. И. Курец; под ред. Н. П. Тузова. – Санкт-Петербург: Наука, 1995. – 276 с.
4. **Сафронов, В. Н.** Электрофизические технологии в производстве строительных материалов / В. Н. Сафронов. – Томск: ТГАСУ, 2014. – 420 с.
5. Способ активации цементной суспензии: пат. RU 2769495 / М. М. Титов, Г. А. Непомнящев, Д. А. Дорофеева. – Оpubл. 01.04.2022.



УДК 693.547.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ БЕТОНА  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ С КОРРОДИРОВАННЫМ БЕТОНОМ

А. И. НИЖЕГОРОВА, В. В. МОЛОДИН

Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
Новосибирск, Россия

Использование железобетона в качестве основного строительного материала на строительных объектах обусловлено высокой коррозионной устойчивостью и низкой трудоемкостью, в отличие от металлоконструкций. Однако в процессе эксплуатации химически агрессивная среда производственного цеха вызывает коррозию бетона. Использование традиционных методов восстановления оказывает временный эффект, впоследствии на поверхности образуются трещины в месте ремонтного стыка.

Бетон – природный материал, его поверхность постоянно взаимодействует с окружающей средой, кислоты и щелочи, растворенные в каплях воды, из окружающей среды свободно проникают в поры бетона, вызывая деструктивные процессы кристаллической решетки цементного камня. Новые соединения являются более устойчивыми, в отличие от исходных компонентов здорового бетона, поэтому при укладке бетонной смеси в контакт новые соединения не вступают в реакцию со старыми.

Основными факторами, влияющими на качество сцепления бетонной смеси и зрелого бетона, являются адгезия и диффузия. Прочные адгезионные контакты образуются лишь когда поверхностная энергия наполнителя значительно выше энергии цемента в соответствии с термодинамической теорией адгезии. Диффузия обусловлена наличием градиента влагосодержания в бетоне восстановления, что приводит к миграции коллоидных частиц вглубь разрушенной структуры «старого» бетона. Одновременный учет данных факторов позволит получить целостную конструкцию и добиться качественного стыка.

Способ предварительного разогрева смеси в [1] позволил увеличить градиент температуры и влажности в зоне контакта, в результате сила сцепления увеличилась в 2,26 раза. Однако данная технология не увеличивает эффект «прилипания» двух материалов различного возраста и состава.

С целью повышения срока эксплуатации конструкции после ремонта и улучшения существующих способов восстановления проведены исследования влияния форсированного разогрева и механической обработки поверхности на адгезию и диффузию бетонов. В результате проведенного эксперимента глубина проникновения бетона восстановления выросла в 1,3 раза, что обеспечивает достаточную монолитность конструкции после ремонта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молодин, В. В. Форсированный разогрев смеси, как фактор увеличения сцепления бетонов, подвергшихся коррозии / В. В. Молодин, А. Е. Ануфриева, А. Х. Навоян // Изв. вузов. Строительство. – 2020. – № 2 (734). – С. 56–71.

УДК 624.159.4

УСИЛЕНИЕ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ НАГНЕТАНИЕМ  
ПОДВИЖНОГО ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОГО РАСТВОРА  
В РЕЖИМЕ ГИДРОРАЗРЫВА

М. Л. НУЖДИН, А. В. ФЕЛЬДБУШ

Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
Новосибирск, Россия

Одним из эффективных способов усиления грунтового основания фундаментов в ходе реконструкции или инженерной подготовки под новое строительство является инъецирование подвижного цементно-песчаного раствора в режиме гидроразрыва [1–7].

Процесс инъецирования заключается в подаче раствора под давлением, превышающим структурную прочность грунта, что приводит к нарушению его сплошности в виде щелевых разрывов с последующим их заполнением инъекционной смесью. После твердения смеси в основании формируются тела с высокими физико-механическими характеристиками, армирующие грунтовый массив [2–5], а также уплотняющие окружающий грунт [1, 4].

Нагнетание в режиме гидроразрыва позволяет решить большое количество геотехнических задач: усиление грунтового основания и фундаментов зданий; выравнивание неравномерных деформаций и кренов; усиление свайных фундаментов; стабилизация просадочных и усиление вечномерзлых грунтов; снижение воздействия динамических нагрузок [6] и др.

Однако существенным недостатком этого способа является невозможность предсказания количества, направления и размеров трещин, образующихся в грунтовом основании при высоконапорном инъецировании через один источник – иньектор.

В настоящее время существует несколько подходов к решению этой проблемы: использование иньекторов специальной конструкции; выполнение технологических приемов, локализирующих распространение инъекционного раствора; метод группового высоконапорного инъецирования [1].

Часто в строительной практике используется манжетная технология, позволяющая управлять процессом нагнетания. Инъецирование ведется через металлические перфорированные трубы с отверстиями, расположенными по высоте с определенным шагом. Снаружи отверстия перекрываются резиновыми манжетами, выполняющими роль обратного клапана. Иньектор с пакером погружается до проектного горизонта – уровня соответствующих отверстий. Давление нагнетания разрывает манжету и обойму, инъекционный раствор внедряется в грунт, при этом пакер препятствует движению раствора внутри иньектора.

Для локализации распространения инъекционного раствора в грунте при инъецировании через одиночный иньектор смесь нагнетают с кратковременными паузами для «самозалечивания» возникающих трещин и разрывов в

грунтовой массиве. Затем выполняется предварительное ослабление пристенного слоя в пределах образуемой полости с целью формирования оболочки из слабого грунта, препятствующей образованию трещин, и производится нагнетание раствора под давлением, не превышающим величины давления гидроразрыва с опрессовкой грунта высоким давлением после завершения процесса инъецирования [7].

Сущность метода группового высоконапорного инъецирования заключается в одновременном нагнетании цементно-песчаного раствора через несколько инъекторов. При расположении инъекторов вдоль прямой линии, с образованием в грунте под их нижними концами линейных полостей глубиной  $10d \dots 20d$  (где  $d$  – диаметр инъектора), в основании формируется плоское вертикальное тело. Одновременная подача раствора через инъекторы, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, с образованием точечных полостей глубиной  $1d \dots 3d$ , приводит к созданию горизонтального тела дисковидной формы. В обоих случаях расстояния между инъекторами не должны превышать  $20d$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва: АСВ, 2023. – 1084 с.
2. **Ибрагимов, М. Н.** Закрепление грунтов в подземном строительстве / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин, А. В. Шапошников. – Москва: АСВ, 2022. – 434 с.
3. **Нуждин, М. Л.** Расчетное обоснование эффективных схем усиления фундаментов мелкого заложения контурным армированием жесткими армоэлементами / М. Л. Нуждин, А. Б. Пономарев // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 5–16.
4. **Нуждин, М. Л.** Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовой массиве инъекционных тел установленной формы / М. Л. Нуждин, Л. В. Нуждин // *Изв. вузов. Строительство*. – 2019. – № 10. – С. 101–112.
5. **Филимонов, С. Д.** Опыт использования метода цементации в режиме гидроразрыва на объектах фирмы «Геомассив» / С. Д. Филимонов // *Тр. VI Петрухинских чтений*. – Москва: Строительство, 2022. – С. 37–43.
6. **Нуждин, М. Л.** Снижение колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками методом высоконапорного группового инъецирования / М. Л. Нуждин, Л. В. Нуждин // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 41–52.
7. **Лушников, В. В.** Высоконапорная инъекция грунтов как способ создания геотехногенных систем в строительстве / В. В. Лушников, В. А. Богомолов // *Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий: материалы Междунар. симп.: в 2 т.* – Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. – Т. 2. – С. 732–740.

УДК 614.8

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА БЕЗОПАСНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕПРОДУКТООБЕСПЕЧЕНИЯ

П. С. ОРЛОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Транспортировка и хранение нефтепродуктов осуществляется с помощью оборудования, которое постоянно контактирует с окружающей средой. Так, по причине длительного взаимодействия стального трубопровода и резервуара с воздухом, водой и грунтами может происходить разрушение материала с последующей разгерметизацией емкости и трубопровода. А в результате утечки может возникнуть взрывопожароопасная ситуация. Наибольшую опасность в таких условиях представляют емкости со сжиженным углеводородным газом (СУГ), расположенные на автомобильных газозаправочных станциях (АГЗС), которые находятся вблизи городских застроек и в местах возможного скопления людей.

В предыдущих исследованиях на тему безопасной эксплуатации опасных производственных объектов был выявлен ряд факторов, которые оказывают влияние на вероятность разрушения емкостей для хранения СУГ на АГЗС [1]. В полученной системе факторов отдельной группой стоят «природные воздействия». Кроме того, следует выделить фактор «климатические условия», который зависит от региона эксплуатации АГЗС, и в большей степени затрагивает резервуары с надземным способом размещения. Хладостойкое исполнение материала позволит избежать хрупкого разрушения емкости при низких температурах.

Также в группу «Коррозия и эрозия» входит фактор «Температура среды», который можно отнести к природному воздействию [2]. Для недопущения коррозии надземных емкостей следует не допускать повышения температуры среды свыше 50 °С. Для снижения вероятности коррозии подземных емкостей применяется изоляционное покрытие различных типов, за состоянием которого необходимо следить и поддерживать в соответствии с требованиями. На ускорение коррозионных процессов влияют такие активные свойства, как кислотность и удельное сопротивление грунта [3], уровень грунтовых вод, глубина заложения резервуара и трубопровода. Поэтому следует устраивать электрохимическую защиту (ЭХЗ), контролировать качество работы и эффективность устройств ЭХЗ.

Подвижки и деформация грунта могут послужить разрушению труб и резервуара. Качество и прочность грунта должны обеспечивать устойчивое положение резервуара.

Также к природным воздействиям относится повышенная грозовая активность, которая увеличивает вероятность удара молнии в емкость с последующим

загоранием. Как показывает статистика, удар молнией может достигнуть как надземный, так и подземный резервуар для хранения топлива.

В результате анализа и оценки были получены веса факторов, влияющих на вероятность разгерметизации резервуара [4, 5]. Для выявления самых существенных факторов, влияющих на итоговую оценку частоты аварии на АГЗС, допустимо провести анализ путем произведений веса группы факторов на вес фактора внутри группы. По результатам вычислений можно представить связанные с природными воздействиями факторы и расположить их по степени важности (табл. 1).

Табл. 1. Веса факторов в системе

Фактор влияния	Надземный резервуар СУГ	Подземный резервуар СУГ
Грозовая активность	0,1235	0,0441
Тип и состояние изоляционного покрытия	–	0,0595
Качество работы устройств ЭХЗ	–	0,0595
Исполнение материала	0,0402	–
Подвижки и деформации грунта	0,0209	0,0153
Коррозионные свойства грунтов	–	0,0119
Состав грунта с точки зрения несущей способности	0,0095	0,0081
Температура среды	0,0088	0,0068
Климатические условия (регион)	0,0054	–
Уровень грунтовых вод	–	0,0045
Глубина заложения	–	0,0045

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орловский, П. С.** Влияние особенностей проектов АЗС на величину риска аварии / П. С. Орловский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев, 2022. – С. 125.
2. **Щур, А. В.** Инженерная экология: учебное пособие / А. В. Щур, Д. В. Виноградов, А. В. Шемякин. – Могилев; Рязань, 2021. – 180 с.
3. **Щур, А. В.** Экология: учебник / А. В. Щур, П. Н. Балабко, Д. В. Виноградов. – Москва; Могилев; Рязань, 2021. – 248 с.
4. **Орловский, П. С.** Анализ риска аварий на опасных производственных объектах нефтепродуктообеспечения в Республике Беларусь / П. С. Орловский // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Ижевск, 2022. – С. 841–843.
5. **Орловский, П. С.** Оценка вкладов различных технических и организационных мероприятий в величину риска аварии / П. С. Орловский // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность-2022): материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию УГАТУ. – Уфа, 2022. – С. 59–61.

УДК 624.072

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС СИСТЕМЫ  
«БАЛОЧНАЯ ПЛИТА – ДВУХСЛОЙНОЕ ОСНОВАНИЕ С НАКЛОННЫМ СЛОЕМ»  
С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА

А. Г. ПУСЕНКОВ

Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь

Актуальность тезисов заключается в том, что в расчетах балочных плит на произвольном упругом основании традиционно учитываются только нормальные напряжения в зоне контакта, а в представленной работе используется новая методика расчета, учитывающая продольные деформации в зоне контакта.

Балочная плита ленточных фундаментов мелкого заложения находится на упругом двухслойном основании с наклонным слоем и внешней нагрузкой  $q(x)$ . Параметры плиты: высота  $h$ , ширина  $2l$ , изгибная жесткость  $EJ$  (постоянная). Упругое основание неоднородно и физически нелинейно: в каждом слое модуль деформации переменный.

Вводим гипотезы (предположения) и допущения для расчета балочных плит на упругом основании: гипотезы теории упругости справедливы для рассчитываемой области упругого основания; допущения и гипотезы плоского изгиба балки справедливы для плиты.

Для решения рассматриваемой задачи применяется вариационно-разностный метод (ВРМ), который реализуется в перемещениях через конечно-разностные соотношения теории упругости (плоская деформация) при использовании функционала полной потенциальной энергии деформации системы:

$$\mathcal{E} = U + A + P, \quad (1)$$

где  $U$  – энергия деформации плиты;  $A$  – энергия деформации упругого основания;  $P$  – работа внешней нагрузки.

Основание при расчете заменяется прямоугольной расчетной областью конечных размеров, на границах которой перемещения равны нулю; в контактной зоне справедливо равенство осадок основания прогибам плиты.

Сначала решается задача в линейной постановке. По вычисленным значениям перемещений  $i$ -й узловой точки ( $u_i(x)$ ,  $v_i(y)$ ) используются геометрические уравнения Коши и конечно-разностные соотношения, определяются интенсивности деформаций и напряжений в центрах ячеек (см. формулы теории упругости).

Имея значения напряжений и перемещений, полученные в результате решения задачи в первом приближении, определяется касательный модуль деформации для каждой ячейки, и задача решается во втором и последующих приближениях с учетом изгибной и продольных жесткостей балочной плиты:

$$E_i^{(n)} = \frac{E_{ok}}{ch^2 \left( \frac{E_{ok}}{\sigma_{yk}} \varepsilon_i^{(n-1)} \right)}. \quad (2)$$

Итерационный процесс заканчивается, как только разница между последующим и предыдущим приближением исследуемой функции будет соответствовать требуемой точности решения задачи:

$$\delta_f = \frac{f_{\max}^{(n)} - f_{\max}^{(n-1)}}{f_{\max}^{(n)}} \cdot 100 \% \leq \xi, \quad (3)$$

где  $f_{\max}^{(n)}$ ,  $f_{\max}^{(n-1)}$  – максимальные значения исследуемой функции для последующей и предыдущей итераций;  $n$  – номер итераций.

Для решения задачи составлена расчетная программа в компьютерной среде Wolfram Mathematica 10.0 и проведена ее числовая апробация для двуслойного основания с наклонным слоем.

Параметры упругого основания:

– первый слой – супесь:  $\sigma_{y1} = 0,2$  МПа;  $\nu = 0,3$ ;  $E = 20$  МПа;

– второй слой – песок средней крупности:  $\sigma_{y2} = 0,4$  МПа;  $\nu = 0,35$ ;  $E = 40$  МПа.

Параметры балочной плиты: бетон марки С 20/25,  $E_{\sigma} = 2,75 \cdot 10^{10}$  Па,  $2l = 1,6$  м,  $h = 0,3$  м, равномерная нагрузка заменяется сосредоточенными силами  $P1 = P3 = 100$  кН,  $P2 = 200$  кН (рис. 1). Критерий сходимости – 3 %.

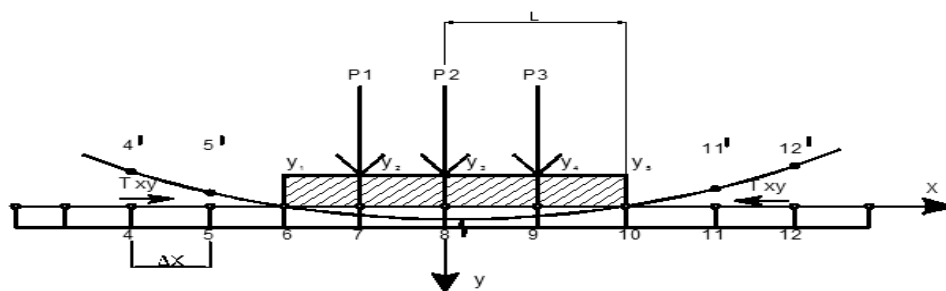


Рис. 1. Зона контактного взаимодействия

На рис. 2 приведены эпюры вертикальных перемещений двухслойного основания с наклонным слоем под балочной плитой с учетом касательных напряжений и без них (сходимость – 2,4 %).

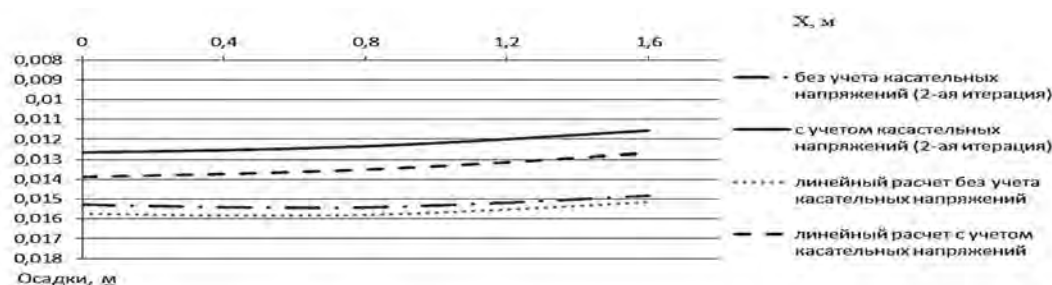


Рис. 2. Эпюра вертикальных перемещений под балочной плитой (осадки основания)

Уменьшение осадок двухслойного основания до 25 % в зоне контакта с балочной плитой указывает на значительное влияние продольных деформаций при введении их в статические расчеты.

УДК 531.36

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТОНКОСТЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

И. И. САФАРОВ, Б. З. НУРИДДИНОВ, Б. Н. МИРЗАКАБИЛОВ

Ташкентский химико-технологический институт

Ташкент, Узбекистан

Магистральные трубопроводы и трубопроводы предприятий энергетической, нефтехимической и других отраслей промышленности составляют достаточно большую часть их материальных активов. Как правило, трубопроводы представляют собой очень высоконагруженные конструкции, поскольку еще при их проектировании с целью экономии металла закладываются фактически самые низкие коэффициенты запаса прочности.

Это требует очень точного обоснования прочности и ресурса при всех возможных видах нагружения [1–10]. Проведение такого анализа невозможно без применения современных вычислительных комплексов. Цель работы – развитие теории и разработка методов исследования динамического напряженно-деформированного состояния криволинейных участков тонкостенных подземных трубопроводов с протекающей жидкостью при воздействии динамических нагрузок.

В результате теоретических научных исследований получено следующее:

– сопоставлен результат для двух волн сдвига с продольными волнами. Он показывает, что при маленьких углах падения на трубопровод (оболочку) продольной волны возникают большие напряжения, чем при двух волнах сдвига. При углах падения  $\Theta_0 > 90^\circ$  SV-волны вызывают большие напряжения, чем продольные. С другой стороны, самые большие осевые напряжения вызываются с помощью SH-волн при  $\Theta_0 = 45^\circ$ . Фактически, максимальное напряжение, вызванное в бетонной оболочке, лежащей в мягком грунте, происходит из-за SH-волны, что значительно больше чем P- и SV-волны вместе взятые. Напряженно-деформированное состояние окружающей среды, вызванное спадающей трех типов волн, разное. Для SV-волн окружное напряжение больше, чем осевое напряжение во всех трех случаях. Для продольных волн, с другой стороны, осевое напряжение больше, чем окружное напряжение в первых двух случаях, и они зависят от угла падения в третьем случае, несмотря на то, что окружное напряжение всегда больше, чем осевое;



– из численных анализов результатов установлено, что изоляция трубопровода мягким грунтом является эффективной только для высоких частот;

– анализ полученных значений показывает, что критическое внешнее давление  $q_0$  растет по мере увеличения параметра толщины  $h/r$ . При этом необходимо отметить, что для труб с большой кривизной  $r/R = 1/10$  величина критического давления больше, чем у труб с меньшей кривизной ( $r/R = 1/30$ );

– наименьшая частота собственных изгибных колебаний  $\min \omega_{mn}$  реализуется для всех рассмотренных типов закреплений концов участков трубопроводов по второй оболочечной форме колебаний при  $m=2$  и  $n=1$ , т. е.  $\min \omega_{mn} = \omega_{21}$ ;

– с увеличением параметра кривизны трубы  $\mu$  частоты собственных изгибных колебаний участков трубопроводов  $\omega_{mn}$  при  $m=1...3$  и  $n=1$  существенно возрастают при любых условиях закрепления концов.

Различие между напряжениями на внешней и внутренней поверхностях трубопровода достигает  $\approx 15\%...20\%$ , а различие между напряжениями на срединной и внутренней поверхностях  $\approx 10\%$  ( $r_0 / r_1 = 0,5$ ).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авлиякулов, Н. Н.** Современные задачи статики и динамики подземных трубопроводов / Н. Н. Авлиякулов, И. И. Сафаров. – Ташкент: Fan va texnologiya, 2007. – 306 с.
2. Численный анализ прочности подземных трубопроводов / В. В. Алешин [и др.]. – Киев: Едиториал УРСС, 2003. – 320 с.
3. **Базаров, М. Б.** Численное моделирование колебаний диссипативно-неоднородных и однородных механических систем / М. Б. Базаров, И. И. Сафаров, Ю. М. Шокин. – Новосибирск: РАН, 1996. – 189 с.
4. **Рашидов, Т. Р.** Сейсмостойкость тоннельных конструкций метрополитенов / Т. Р. Рашидов, И. Я. Дорман, А. А. Ишанходжаев. – Москва: Транспорт, 1975. – 120 с.
5. Нестационарные колебания сферических оболочек в вязкоупругой среде / Н. У. Кулдашов [и др.]. – Ташкент: Рахматулинские чтения, 2023. – 239 с.
6. **Новацкий, В.** Теория упругости / В. Новацкий. – Москва: Мир, 1975. – 872 с.
7. Колебания плоских вязкоупругих элементов машиностроительных конструкций / З. И. Болтаев [и др.] // Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. – Нальчик: Кабардино-Балкар. гос. ун-т им. Х. М. Бербекова, 2023. – С. 233.
8. **Рашидов, Т. Р.** Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений / Т. Р. Рашидов. – Ташкент: Фан, 1973. – 180 с.
9. **Бабаков, И. М.** Теория колебания / И. М. Бабаков. – Москва: Наука, 1968. – 554 с.
10. **Сафаров, И. И.** Колебания и волны в диссипативно-неоднородных средах и конструкциях / И. И. Сафаров. – Ташкент: Фан, 1992. – 250 с.

УДК 691.72

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ В МОСТОСТРОЕНИИ

А. М. СЕРГЕЕВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Выполнен подбор и проанализирована научно-техническая информация о зарубежной практике строительства и эксплуатации мостовых сооружений из алюминиевых сплавов.

Впервые алюминиевый мост был построен в США в 1946 г. с целью продемонстрировать возможности использования алюминиевых сплавов при строительстве мостов. В 1969 г. в Санкт-Петербурге возведен первый в России мост из алюминия, который и сейчас успешно эксплуатируется. С тех пор значительное количество таких мостов, построенных за рубежом, в том числе и в Российской Федерации, прошло проверку временем и доказало свою целесообразность.

Конструкции мостов с использованием алюминия доказали свою эффективность по следующим показателям:

- отсутствие коррозионных процессов в структуре материала;
- значительное снижение нагрузки от собственного веса по сравнению со сталью и железобетоном;
- хорошо переносят очень низкие температуры;
- имеют повышенную сейсмостойкость;
- простота в обслуживании на протяжении всего периода эксплуатации.

Но наряду с обозначенными выше достоинствами алюминиевые сплавы имеют такие недостатки, как:

- незначительный модуль упругости, что приводит к росту деформаций от эксплуатационных нагрузок;
- при динамических нагружениях за короткий промежуток времени могут возникнуть усталостные разрушения;
- в узлах мостовых конструкций, являющихся концентраторами напряжений, возникает опасность появления силовых трещин.

Природно-климатические и экономические условия Беларуси позволяют возводить пролетные строения мостовых сооружений из алюминия и сплавов на его основе. Снижение собственного веса конструкций дает возможность применять их при капитальном ремонте или реконструкции существующих сооружений. Предпочтительнее использовать алюминий для малых и средних пешеходных или совмещенных мостов. При возведении и эксплуатации сооружений минимизируется влияние на окружающую среду во время проведения технических процессов.

Одна из основных причин, по которой мосты из алюминиевых сплавов не строятся в Республике Беларусь, – отсутствие нормативной документации, регламентирующей их проектирование.

УДК 625.7

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А. М. СЕРГЕЕВА, Т. А. ПОЛЯКОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Проведенный анализ аварийности на автомобильных дорогах показал, что до 30 % дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходит из-за ошибок, допущенных на этапе проектирования [1]. Нормы проектирования плана, продольного и поперечного профилей автомобильной дороги [2] не всегда обеспечивают безопасность движения на эксплуатируемом объекте.

Одним из элементов поперечного профиля, обеспечивающим безопасность движения на магистралях высоких категорий, является разделительная полоса, ширина которой составляет 1...2 м в соответствии с нормативными требованиями [2]. В то же время зарубежные нормы (стран Европы) предусматривают ширину разделительной полосы в пределах 3...3,75 м. По данным зарубежных исследований на четырехполосной дороге ее наличие снижает количество ДТП с травматизмом на 10 % [3].

Однако опыт зимней эксплуатации автомобильных дорог Республики Беларусь выявил ряд проблем, среди которых авторы выделили вопросы выбора типа покрытия разделительной полосы и способов отвода воды от таяния снега на ней.

Традиционно в нашей стране при проектировании дорог высоких категорий разделительную полосу по экономическим соображениям устраивают из грунта с укреплением засевам трав. Ее поверхности придают нулевой поперечный уклон.

В зимний период при проведении снегоочистки проезжей части в реальных условиях рабочие органы снегоочистительных механизмов не доходят до края разделительной полосы на 10...20 см во избежание повреждений, оставляя неубранным участок, что приводит к уменьшению ширины полосы движения и скоплению снега.

В зимне-весенний период при прогреве асфальтобетонного покрытия проезжей части и интенсивном таянии снега, грунт разделительной полосы еще находится в промерзшем состоянии по глубине, вода не может впитаться и всей поверхностной воде приходится постепенно стекать по поперечному уклону на левую полосу проезжей части, где автомобили производят обычно маневр – обгон, т. е. движутся с максимальной разрешенной скоростью.

Образующаяся водяная пленка снижает коэффициент сцепления колеса обгоняющего автомобиля с покрытием. При движении из-под колес вырывается водяной шлейф, значительно снижающий видимость для обгоняемого автомобиля (рис. 1).

Указанные факторы снижают безопасность дорожного движения в период начального таяния снега.



Рис. 1. Условия движения по левой полосе при таянии снега

Для решения данных проблем предлагаем:

- на уровне нормативных документов рекомендовать устраивать на разделительной полосе твердое покрытие, что улучшит качество механизированной очистки от снега;
- для обеспечения требуемого коэффициента сцепления использовать поверхностную обработку и специальную отделку поверхности покрытия;
- на разделительной полосе проектировать двускатный поперечный профиль с уклоном к оси дороги 5...15 ‰ для обеспечения стока воды;
- для дальнейшего отвода воды использовать водосбросные лотки открытого или закрытого типов с дождеприемными колодцами через 60 м (с учетом продольного уклона);
- шире использовать интеллектуальные транспортные системы (ИТС) для управления информацией о погоде на дороге, прогнозировании погоды и уровня воды.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полякова, Т. А. Анализ аварийности на автомобильных дорогах / Т. А. Полякова, П. А. Стальмаченок // Инновации в информационных технологиях, машиностроении, автотранспорте: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 29–30 нояб. 2017 г. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2017. – С. 517–519.
2. СН 3.03.04–2019. Автомобильные дороги. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2019. – 116 с.
3. Проект свода правил по проектированию геометрических элементов автомобильных дорог и транспортных пересечений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rodosnpi.ru>.

УДК 694.141.4

## АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОПИЛЬНЫХ СИСТЕМ В ТРАДИЦИОННОМ ДЕРЕВЯННОМ ЖИЛОМ ДОМЕ

Е. С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В современной строительной практике деревянные стропильные конструкции для жилого частного домостроения являются одними из самых распространенных. Это обусловлено не только высокими эксплуатационными свойствами древесины для решения данного типа задач, но и богатым опытом, накопленным на территории нашего государства. Так, ряд сохранившихся сооружений представляют собой источники знаний о технологии возведения, инженерных решениях, а также об архитектурных аспектах. Однако на данный момент значительная часть объектов деревянного домостроения находится в ненадлежащем техническом состоянии из-за следующих факторов: нарушения условий эксплуатации, ошибки проектирования, разрушения древесины под воздействием биологических факторов (плесень, грибок, насекомые), случайные аварийные ситуации и др. Влияние данных аспектов является особенно опасным для узловых соединений стропильных систем, т. к. они обычно являются точками концентрации напряжений и усилий. Следовательно, понимание механики разрушения стыков отдельных элементов является важной частью при проведении ремонтно-восстановительных работ.

Основными задачами, которые возлагаются на узловые соединения, являются: обеспечение несущей способности и устойчивости здания и его отдельных частей, передача усилий между отдельными элементами, поддержание условий эксплуатационной пригодности, предоставление возможности передислокации и высокого уровня сборности, а также придание архитектурной выразительности при условии наличия визуального доступа. Данные вопросы актуальны для стропильных систем всех сооружений в общем и жилых домов в частности ввиду их высокой степени ответственности, а также переменности действия различных нагрузок и воздействий в эксплуатационной стадии.

В традиционных белорусских стропильных конструкциях можно выделить достаточно много типовых столярных соединений, которые возникли под влиянием архитектурных и строительных аспектов в разные периоды времени и в разной местности. В основном данные соединения классифицируют по геометрическим признакам и назначению. Также здесь имеет значение взаимное расположение отдельных элементов, таких как стропильные ноги, затяжки, схватки и т. д. Одними из самых распространенных для Беларуси и сопредельных регионов соединениями являются сопряжения стропильной ноги с затяжкой с помощью простого нахлеста или нахлеста с наклонным зубом по принципу «ласточкин хвост». Оба соединения выполняются с установкой нагеля по отверстиям, заранее просверленным сквозь соединяемые части конструкции.

В качестве нагеля в традиционном деревянном домостроении выступал элемент круглого сечения из твердых пород древесины (обычно дуба), а в более поздних – металлические соединительные элементы.

Для описанных выше узлов стропильных систем произведено моделирование с помощью программного комплекса ANSYS по схемам, соответствующим реальным условиям эксплуатации (рис. 1). Прочностные свойства материалов задавались по СП 5.05.01–2021 [1] как для древесины хвойных пород класса С14 и С16 для стропильных ног и стяжек, так и лиственных пород D50 для нагелей, что приблизительно соотносится с показателями применявшейся ранее древесины.

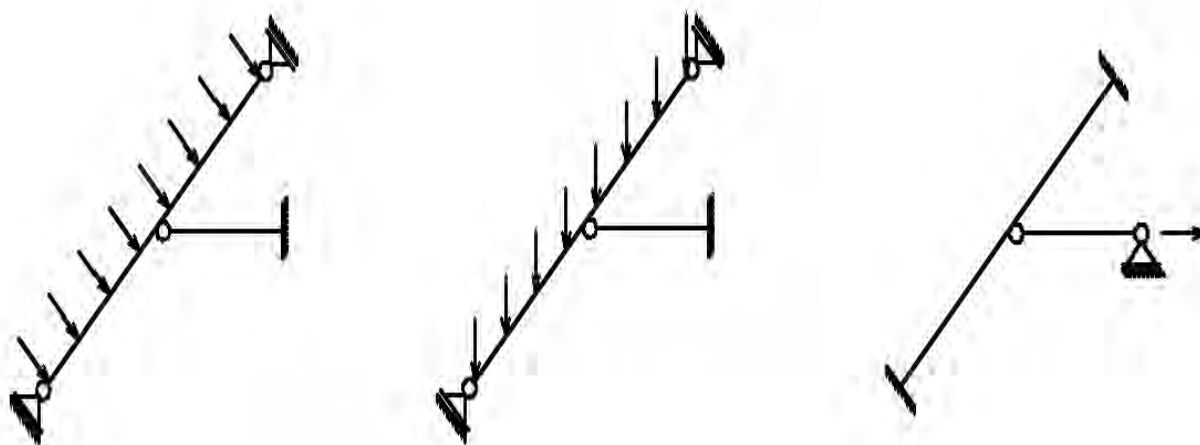


Рис. 1. Расчетные схемы моделирования узловых соединений

Проведенное моделирование продемонстрировало, что традиционные узлы успешно сопротивляются приложенным к ним нагрузкам с учетом первого и второго предельных состояний. Однако поведение отдельных частей стыкуемых элементов демонстрирует, что потенциал соединений реализуется не в полной мере и несущую способность можно повышать за счет изменения геометрии и формы стыков.

Таким образом, знания о статической работе столярных соединений в стропильных конструкциях традиционных жилых домов в настоящее время продолжают развиваться, но все еще остаются довольно неорганизованными и не полными. При этом применение новых программных средств, оперирующих методом конечных элементов, может помочь в предсказании реального их поведения, что, в свою очередь, позволит более эффективно решить вопросы в области реконструкции и восстановления памятников деревянного зодчества, а также помочь при конструктивных расчетах самых различных элементов, основанных на применении накопленного народного опыта.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 5.05.01–2021. Деревянные конструкции. – Минск: Госстандарт, 2021.

УДК 616-001.26

## АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА КАРДИОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ

И. В. ШИЛОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Персонал кардиологического отделения осуществляет хирургические вмешательства, проводимые на кровеносных сосудах чрескожным доступом под контролем методов лучевой визуализации (рентгенография и рентгеноскопия) с помощью аппарата Azurion 7 M20 с максимальным напряжением на рентгеновской трубке 125 кВ. Рентгенография позволяет получать статические снимки, а рентгеноскопия – видеоизображение сосудов и сердца в режиме реального времени. Основной вклад в дозу персонала вносит рентгеноскопия.

Все работники, отнесенные приказом по организации к категории «персонал», должны быть снабжены дозиметрами, позволяющими измерять и оценивать индивидуальную дозу. В Республике Беларусь персонал всех учреждений здравоохранения обеспечивается термолюминесцентными дозиметрами, состоящими из шариков или цилиндров из вещества, обладающего эффектом термолюминесценции, помещенных в пластмассовый корпус. Такие дозиметры не являются прямопоказывающими. Накопленную дозу можно узнать с помощью специальных считывающих установок типа Доза-ТЛД, которые есть только в центре гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья. Поэтому один раз в квартал туда отправляются все дозиметры с учреждения здравоохранения, дозы считываются и заносятся в индивидуальную карточку учета доз персонала. Например, в индивидуальной карточке врача-рентгеноэндовазкулярного хирурга за 2022 г. была указана доза на уровне груди 1,117 мЗв.

Были проведены опросы нескольких десятков медицинских работников учреждений здравоохранения Могилевской области, которые показали, что к показаниям термолюминесцентных дозиметров имеется чрезвычайно низкий уровень доверия. Была поставлена задача провести исследование индивидуальных доз персонала кардиологии с помощью прямопоказывающих дозиметров МКС АТ2503 с возможностью измерения индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$ , носимых на уровне груди, для сравнения с показаниями термолюминесцентных дозиметров  $H_p(10)$ . Для оценки дозы за год использовалась средняя недельная доза, для расчета которой использовалось суммарное время рентгеноскопии за несколько разных недель, а также средняя доза, полученная персоналом в минуту. Учитывалось, что персонал кардиологии с учетом отпуска в год работает 45,5 рабочих недель. В результате измерений доза у врача-рентгеноэндовазкулярного хирурга составила  $(0,552 \pm 0,141)$  мЗв/год, что хорошо коррелирует с показаниями термолюминесцентного дозиметра. Это значение ниже предела дозы персонала (20 мЗв) в год и граничной дозы облучения персонала (6 мЗв) в год. Доза на конечности и хрусталик глаза не учитывалась.

УДК 694.141.4

## ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНАХ НА ИХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

М. А. ШКИЛЬНЮК

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Детализированный расчет величины тепловых потерь через строительные конструкции и моделирование теплофизических процессов, протекающих в ограждающих конструкциях, позволяет учитывать не только геометрические и теплотехнические характеристики, но и особенности конструирования и изготовления строительных конструкций, а также наличие дополнительных мелкогабаритных теплопроводных элементов, позволяющих определять зоны промерзания конструкций на стадии проектирования. Показаны особенности моделирования тепловых полей и теплового потока в ограждающих конструкциях при использовании стальных закладных изделий и элементов.

Согласно закону Фурье, существует однозначная взаимосвязь между градиентом температуры и возникающим тепловым потоком. Величина теплового потока, проходящего через плоскую стенку, может быть определена как зависимость теплового потока от теплопроводности плоской стенки, ее толщины и площади, а также разницы наружной и внутренней температур:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \lambda \cdot A \frac{dt}{dx} = - \int_A \frac{dt}{dx} dA, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $A$  – площадь плоской стенки, через которую проходит теплоперенос, м<sup>2</sup>;  $t_1 - t_2$  – разница температур на внутренней и внешней поверхности, К;  $dt/dx$  – дифференциация температур по толщине материала стенки;  $\delta$  – толщина стенки, м;  $dA$  – элементарный элемент плоской стенки  $A$ .

Рассмотрим элементарный параллелепипед, выделенный из тела, образованный гранями  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  (рис. 1).

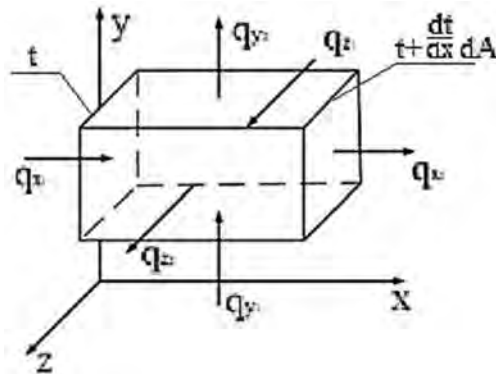


Рис. 1. Теплообмен элементарного элемента



Детальное теплотехническое моделирование указанного участка стены с учетом теплотехнически неоднородных элементов (рис. 2) и участка стены без учета теплотехнически неоднородных элементов (рис. 3) показывает, что конструкция не соответствует требованиям норм Республики Беларусь СП 2.04.01–2020 [1], вследствие значительного промерзания в местах теплотехнических неоднородностей, геометрические параметры которых при этом нельзя детально указать при традиционном проектировании. Это не коррелируется с результатами тепловизионных обследований, результаты которых в зонах расположения арматурных изделий показали соответствие требованиям величины температуры на поверхности строительной конструкции.

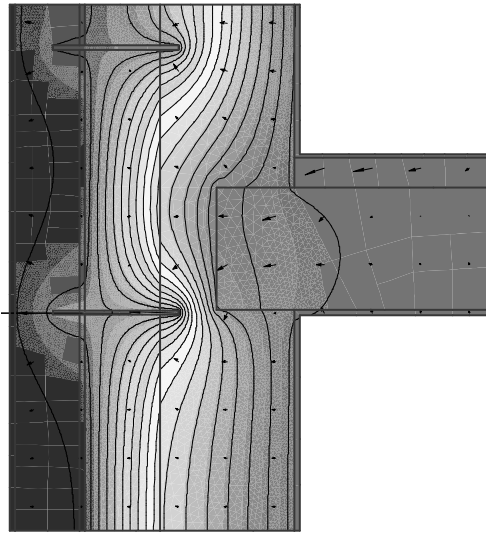


Рис. 2. Теплопередача через ограждающие конструкции междуэтажного перекрытия с гибкими связями

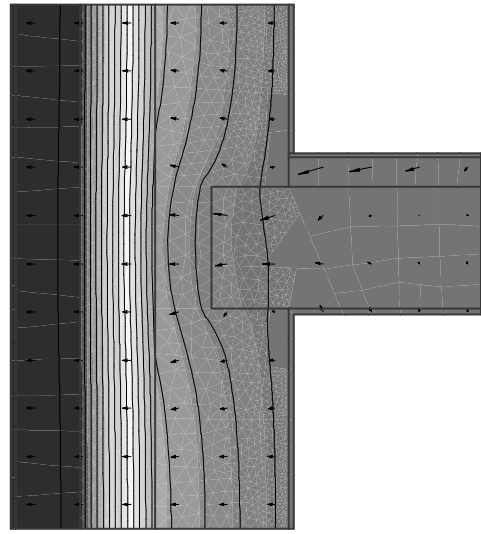


Рис. 3. Теплопередача через ограждающие конструкции междуэтажного перекрытия без гибких связей

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Упрощенный теплотехнический расчет приводит к последующему упрощенному конструированию тепловой защиты, что выражается в запасе закладываемого утеплителя в узлах сопряжения конструкций, нерациональному, а зачастую неверному его конструированию, и, соответственно, увеличению стоимости строительной продукции и наличию ошибок при проектировании.

2. Проведение машинного моделирования реального здания позволяет наиболее точно учитывать особенности конструирования бесконечно малых элементов, особенности их теплофизических и теплотехнических свойств, точные геометрические характеристики применительно к конкретной марке изделия, но не позволяют передать особенности конструирования даже в детализированных расчетах, что требует их уточнения в нормативных документах.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 2.04.01–2020. Строительная теплотехника. – Минск: Минстройархитектуры, 2020.

УДК 796.8

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

А. В. ЩУР, Г. Н. ДРАКИН

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Качество воздушной среды напрямую влияет на состояние здоровья человека. Установлено, что частота сердечно-сосудистых заболеваний напрямую коррелирует с качеством атмосферного воздуха. Микробиологическая обсеменённость воздуха внутри помещений детерминирует частоту и сложность заболеваний дыхательной системы. Аэроионный состав воздуха влияет на общее самочувствие человека и его иммунитет [1–4].

Кондиционирование воздуха зачастую не обеспечивает его обеззараживание. В некоторых случаях кондиционер может становиться источником инфекции. В частности, вспышки легионеллёза связаны с зараженностью возбудителями именно кондиционеров. Регистрация массовых случаев респираторных вирусных инфекций на круизных лайнерах связана с недоочисткой воздуха, поступающего по системам вентиляции от биологических агентов.

В рамках гранта университета авторами разработано устройство по очистке и кондиционированию воздуха внутри офисов. Устройство включает систему фильтров, камеру с ультрафиолетовым облучением проходящего через неё воздуха и аэроионизатор. Разработано программное обеспечение, позволяющее управлять устройством и снимать текущие показатели. Также предусмотрено сохранять показатели деятельности устройства и выводить их в цифровом виде и в виде диаграмм. Данное устройство уменьшает уровень запыленности и количество микроорганизмов в воздухе помещений, а также улучшает аэроионный состав воздуха. Оно способно непрерывно работать не менее 8 ч, таким образом обеспечивая защиту сотрудников от пыли и вредных микроорганизмов. Кроме того, разработанный прибор можно использовать в качестве демонстрационного стенда при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Охрана труда», «Безопасность жизнедеятельности человека». В этом случае студенты получают возможность наглядно оценить снижение уровня запыленности и микробиологической обсеменённости воздуха помещений [5–8].

Апробация устройства продемонстрировала его эффективность по очистке воздуха от пыли и микроорганизмов, включая споры плесневых грибов.

Плесневые грибы могут вызывать аллергические реакции у чувствительных людей, а также различные микозы у лиц с ослабленным иммунитетом.

Таким образом, разработанный прибор имеет несколько направлений использования и позволяет снизить загрязненность воздушной среды помещений.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерная экология : учебное пособие / А. В. Щур [и др.]. – Могилев; Рязань: ИП Коняхин А. В., 2021. – 180 с.
2. Основы общей и прикладной экологии / М. В. Романов [и др.]. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. – 171 с.
3. Безопасность жизнедеятельности человека / А. В. Щур [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – 426 с.
4. Экология: учебник / А. В. Щур [и др.]. – Москва; Могилев; Рязань: ИП Колупаева Е. В., 2021. – 248 с.
5. **Щур, А. В.** Подходы к очистке воздуха офисных и жилых помещений / А. В. Щур, А. А. Александронец // Безопасный и комфортный город: сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Орел, 6–8 июня 2022 г. – Орел: Орлов. гос. ун-т им. И. С. Тургенева, 2022. – С. 383–385.
6. Оценка качества воздуха помещений на полигонах твердых коммунальных отходов по микробному загрязнению и способ его очистки / К. В. Воробьев [и др.] // Поволж. эколог. журн. – 2023. – № 1. – С. 20–36.
7. Indoor Air Quality Assessment on Polygons for Solid Municipal Waste for Microbial Contamination and a Method of Cleaning It / К. V. Vorobyev [et al.] // Biology Bulletin. – 2023. – Vol. 50, № 10. – P. 124–131.
8. Устройство по очистке воздуха жилых и офисных помещений / А. В. Щур [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 3 (80). – С. 161–167.

УДК 620.179.16+54.1

## ОЦЕНКА МАРКИ ЧУГУНОВ ПО ДАННЫМ СТРУКТУРНОГО ШУМА

А. Р. БАЕВ, М. В. АСАДЧАЯ, Н. Н. ГИЛЬ, В. В. ПАРАДИНЕЦ

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Повышение надежности контроля структуры чугунов и их физико-механических свойств (ФМС) не только в объеме, но и в локальных областях конкретного металлоизделия является важной научно-технической задачей машиностроительной промышленности. Для этих целей предложен ультразвуковой способ, реализуемый путем одновременного определения как скорости ультразвука  $C$  в объеме чугуна, так и амплитуды  $A^{CSH}$  структурного шума (СШ), создаваемого в результате рассеяния поверхностных волн на частицах пластинчатого графита в металле. Форма и размеры последних оказывают существенное влияние на ФМС чугунов [1], включая прочность на разрыв  $\sigma$ , упругие модули и др. При этом  $A^{CSH} = [\sum_{i=1}^{i=i_0} (A_i)^2]^{1/2} / i_0$  выбрана в качестве информативного параметра, характеризующего свойства чугунов в локальных зонах металла и представляет среднеквадратичное значение  $i_0$  показаний амплитуды  $A_i(t_i)$  поля рассеяния акустических импульсов (рис. 1).

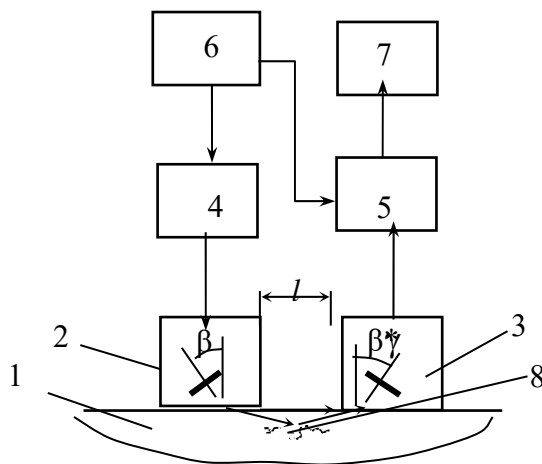


Рис. 1. Схема исследования структурного шума в чугунах: 1 – объект; 2, 3 – преобразователи для излучения-приема УЗК; 4, 5 – генератор и приемник УЗК; 6 – прибор И1-8; 7 – электронный блок обработки сигналов; 8 – включения графита

Причем временной диапазон выборки  $t_1 < t_i < t_2$  принимаемого для обработки с помощью специальной программы сигнала определяется из условия, при котором нивелируется влияние паразитного шумового фона. На первом этапе исследований установлены оптимальные параметры ультразвукового устройства, включая рабочую частоту, углы наклона составляющих устройство преобразователей  $\{\beta, \beta^*\} = 3^\circ \dots 9^\circ$  и расстояние между ними. Объектом исследований служили изготовленные на Минском автомобильном и тракторном заводах образцы чугунов, принадлежащие к маркам серого

(СЧ10...СЧ25), высокопрочного ковкого (КВЧ35, ВЧ45...ВЧ50) чугунов, имеющие в основе ферритную и перлитную фазы, на которые получены данные о ФМС и их структуре. На рабочей частоте 5 МГц получены характерные зависимости амплитудно-временных характеристик  $A(t)$  (что частично отражено на рис. 2), а также зависимости  $A^{СШ}$  и скорости  $C$  продольных волн от временного сопротивления разрыву при растяжении  $\sigma = 120...650$  МПа. В результате исследования выявлена существенная разница между параметрами структурного шума для исследуемых образцов.

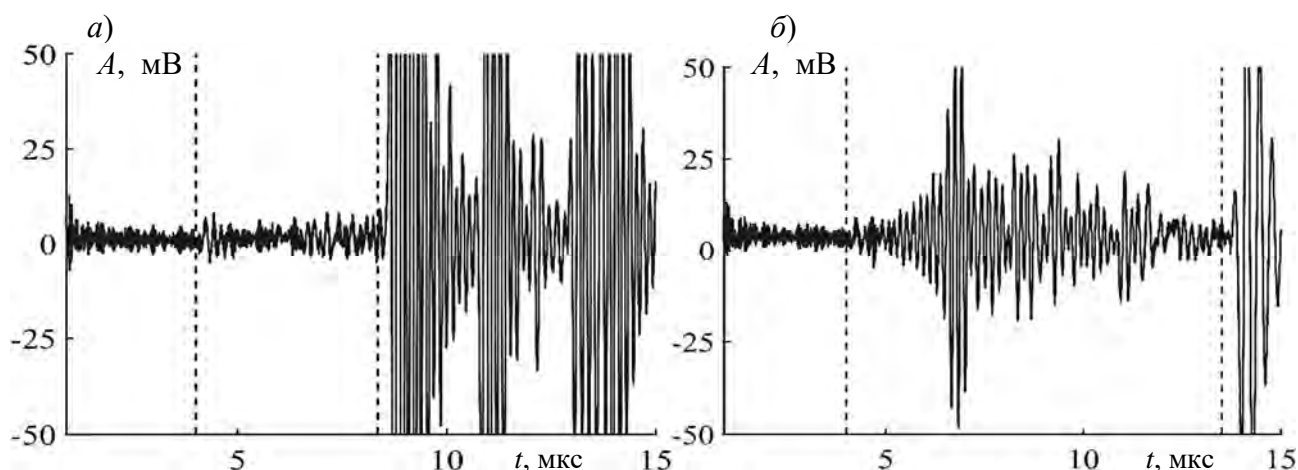


Рис. 2. Характерные амплитудно-временные зависимости структурного шума в образцах чугуна ВЧ50 (а) и СЧ15 (б):  $A^{СШ}$  равна 2,4 мВ (а) и 10,8 мВ (б)

Отметим, что подобный подход был применен для оценки балльности зерна в стали [2]. Так, для марок серого чугуна (СЧ10...СЧ25), в которых преобладают включения графита пластинчатой формы, значение  $A^{СШ}$  на 13...14 дБ и более превышает значение, измеренное для высокопрочного чугуна ВЧ50 с преобладающей формой включений графита шаровидной формы. В то же время увеличение продольной скорости в указанном диапазоне изменения  $\sigma$  составило  $\sim 15\%$ . Что касается чугуна КВЧ35, то значение  $A^{СШ}$  на 7...8 дБ превышает измеренное на образцах ВЧ. На основании проведенных исследований предложен способ отбраковки высокопрочных чугунов типа ВЧ45 и с более высокой маркой от серых чугунов, а также ряда других, включая КВЧ35. При этом оценка структуры локальной области чугуна может производиться при одностороннем прозвучивании объекта без использования дополнительного опорного сигнала, отраженного от противоположной стенки. С другой стороны, при наличии последней представляется возможным также оценивать структуру чугунов как в объеме материала (по данным скорости  $C$  распространения УЗК), так и величине  $A^{СШ}$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – 2-е изд. – Москва: Машиностроение, 2006. – 864 с.
2. Контроль структурного состояния сталей с помощью акустических шумов / В. В. Муравьев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2 (9). – С. 62–64.

УДК 620.179.16+54.1

## ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПОЛЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, М. В. ВОРОБЕЙ

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Рассмотрены особенности использования упругих мод, распространяющихся преимущественно тангенциально контактной поверхности тонкостенных полых объектов (ТПО), включая двухслойные, для контроля их физико-механических свойств и толщинометрии, когда применение традиционных методик ограничено. В первой части работы изучены возможности определения динамического модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , а также механических напряжений  $\sigma$  в ТПО при одностороннем доступе и отсутствии условий для получения опорного сигнала от оппозитной (внутренней) поверхности стенки, во второй части – разработана методика и устройство толщинометрии и сцепления двухслойных ТПО толщиной от нескольких десятых долей миллиметров и более с применением пластинчатых волн.

Ввиду ряда указанных трудностей при реализации традиционных методик для определения  $E$  и  $\nu$ , характеризующих структуру материала ТПО, а также механических напряжений, определены условия и выявлены возможности совместного применения подповерхностных продольных (ПВ) и поверхностных (R) мод в качестве зондирующих. Так что измеряя скорости продольной подповерхностной  $C_l$  и поверхностной  $C_R$  волн теньвым способом, а также используя известную зависимость  $C_{R,l} = (E/\rho)^{0,5} F_{R,l}(\nu)$  [1], представляется возможным определить искомые параметры. Учитывая особенности формирования поля излучения-приема ПВ в металле [2], выполнен в приближении лучевой акустики расчет и проведены экспериментальные исследования (рис. 1) влияния толщины  $h$ , акустической базы  $L$  и длины волны ПВ  $\lambda$  на параметры зондирующего акустического импульса, содержащего несколько осцилляций с соответствующим номером  $n$ . При этом выведенное соотношение

$$\varepsilon = \frac{h}{\lambda} > \varepsilon^* = \frac{h^*}{\lambda} = \sqrt{\frac{n^2}{4} + \frac{n L}{2 \lambda}}$$

позволяет предварительно оценить условия проведения измерений без наложения сопутствующей отраженной моды на осцилляцию зондирующего импульса с порядковым номером периода колебаний  $n$ . Экспериментальные

данные свидетельствуют о неплохом соответствии с расчетными, полученными для  $n = 1$  в пределах 15 % при оценке акустической базы. При этом необходимая точность измерений скорости ПВ, составляющая 0,1 %...0,2 %, может быть достигнута при  $h > 4...5$  мм, если частота волны не менее 5 МГц. Необходимо отметить, что измеряя скорость поверхностной волны  $C_R$ , локализованной на глубину  $h < 2\lambda$ , представляется возможным не только использовать ее для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона, но и в качестве опорного сигнала при измерении механических напряжений.

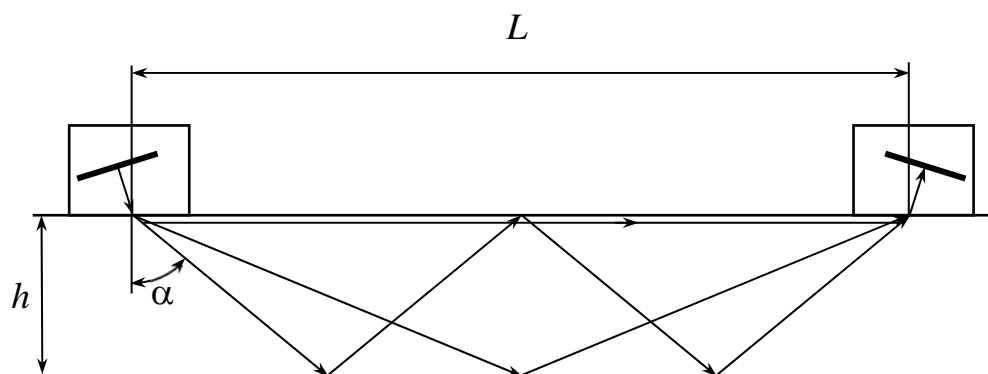


Рис. 1. Распространение ПВ в волноводе ограниченной толщины

Для существенного повышения производительности и точности измерений при контроле двухслойных материалов разработаны малоапертурные (ненаправленные) преобразователи, работающие как для излучения, так и приема поверхностных и пластинчатых волн в материалах толщиной от 0,1 мм и более, и с разными упругими свойствами. Одна из схем измерений (рис. 2) предназначена для определения толщины оловянно-свинцового припоя на латунном основании толщиной  $h_2 < 0,2$  мм.

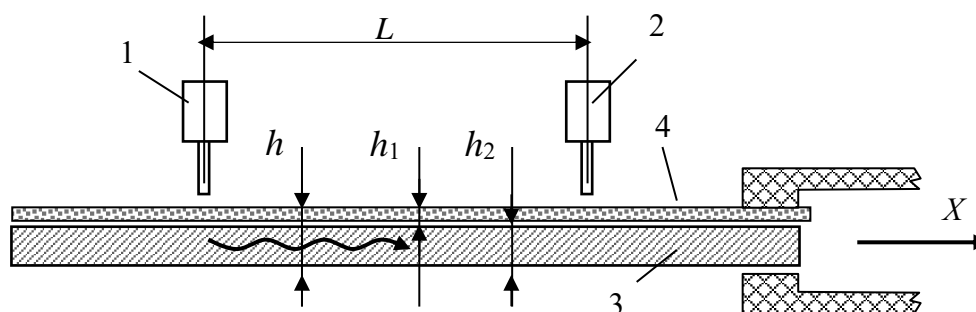


Рис. 2. Одна из экспериментальных схем измерения толщины покрытия и определения дефектов несцепления материалов: 1, 2 – излучающий и приемный малоапертурные преобразователи; 3 – латунная основа образца; 4 – покрытие образца

При этом установлено, что в диапазоне изменения толщины покрытия  $h_1$  от 0 до 5 мкм погрешность измерений не хуже 1 мкм, а при  $h_1 > 15...20$  мкм – не более 10 %...15 %. Используя метод аддитивности плотностей и обратных модулей упругости материала покрытия и основы образца, получены выражения для оценки скорости УЗК, а также длины несцепления материалов (вдоль оси X), расчетные данные которых находятся в неплохом соответствии с опытными данными. Достаточно эффективным является также предложенный подход и для контроля двухслойных ТПО с существенным (4–5 раз и более) отличием упругих модулей, что реализовано на образцах фольгированного гетинакса. При этом установлена возможность измерения по данным скорости пластинчатой моды изменения толщины как покрытия, так и его основы при одностороннем вводе-приеме УЗК.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – Москва: Наука, 1981. – 288 с.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – 2-е изд. – Москва: Машиностроение, 2006. – 864 с.



УДК 534.86

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ ТИПА ШАХМАТНОЙ ДОСКИ ПРИ СДВИГЕ ФАЗ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЭП

В. И. БОРИСОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, Е. Н. ПРОКОПЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В настоящее время при проведении ультразвукового неразрушающего контроля большое внимание уделяется вопросам повышения чувствительности и разрешающей способности. Для этих целей используются многоэлементные пьезопреобразователи (ПЭП) – фазированные решетки, состоящие из отдельных пьезоэлектрических элементов, на которые подаются возбуждающие электрические сигналы с различными фазами.

В работе приведены результаты анализа возможности перестройки фокусного расстояния преобразователя в виде семидесятидвухэлементной фазированной решетки типа шахматной доски.

Расчет акустического поля проводился по методике [1–3] для пьезопластины, работающей в непрерывном режиме на частоте 4,55 МГц, которая нагружена на воду. Анализ поля излучения решетки при нулевом сдвиге фаз между элементами представлен в [1].

На рис. 1 и 2 приведено распределение акустического давления  $P$  вдоль акустической оси  $z$  ПЭП при различном значении начальных фаз между элементами решетки.

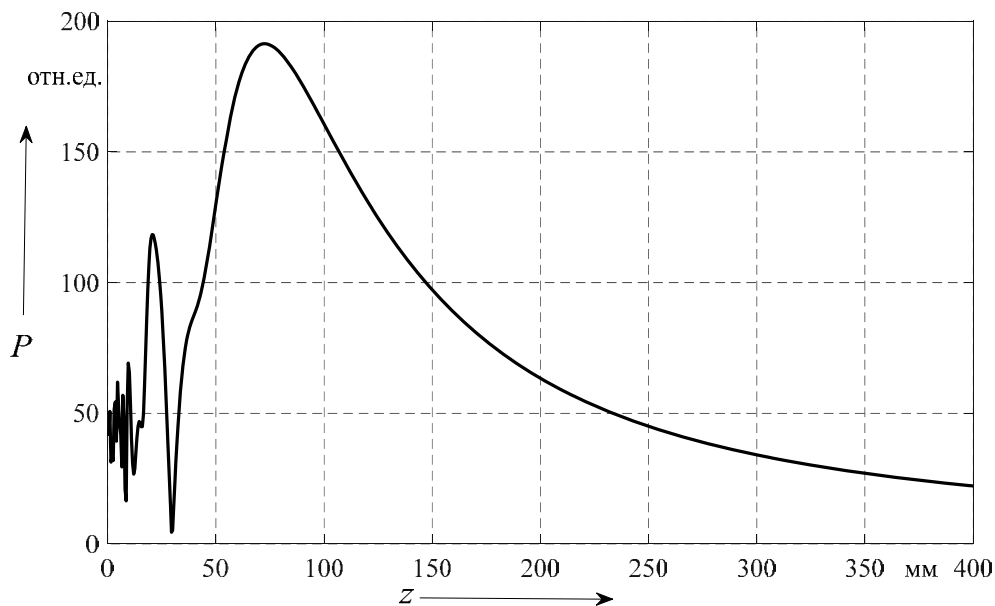


Рис. 1. Распределение давления акустических волн вдоль оси фокусирующего пьезопреобразователя при сдвиге фаз между элементами решетки  $\pi/17$  рад

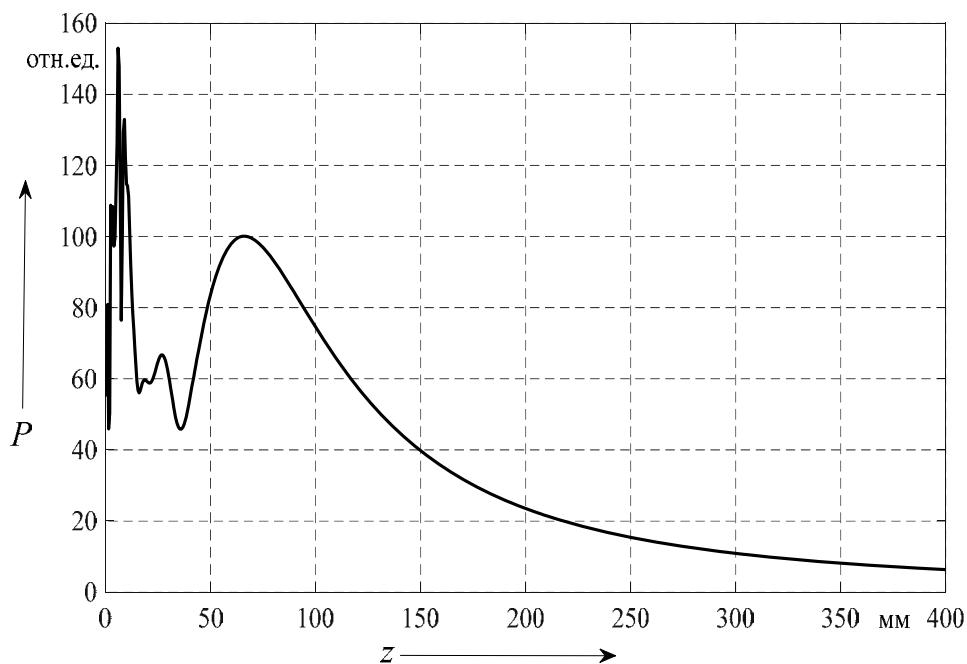


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль оси фокусирующего пьезопреобразователя при сдвиге фаз между элементами решетки  $\pi/6$  рад

Из приведенных рисунков видно, что при наличии начального сдвига фазы между элементами решетки в поле излучения преобразователя наблюдается появление дополнительного четко выраженного максимума излучения, который расположен ближе к плоскости решетки. При дальнейшем увеличении сдвига фазы (см. рис. 2) происходит увеличение давления акустических волн в дополнительном максимуме и уменьшение в основном, а также наблюдается смещение дополнительного максимума к плоскости решетки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борисов, В. И.** Акустическое поле излучения пьезопреобразователей в виде фазированных решеток типа шахматной доски / В. И. Борисов, А. С. Никитин, Е. Н. Прокопенко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 22–23 апр. 2021 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 275–276.
2. **Борисов, В. И.** Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // *Вестн. Беларус.-Рос. ун-та.* – 2014. – № 2 (43). – С. 105–113.
3. Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде двухмерной прямоугольной фазированной решетки / В. И. Борисов [и др.] // *Вестн. Беларус.-Рос. ун-та.* – 2021. – № 2 (71). – С. 58–67.

УДК 620.179.14

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ВОЛНОВОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕТЛИ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ

В. А. БУРАК

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Контроль медицинских изделий на всех стадиях их производства и использования является актуальной задачей. Неразрушающие методы контроля позволяют осуществлять такой контроль. Для применяемых в медицине волноводов, предназначенных для разрушения тромбов [1], необходимо обеспечивать диаметры составных частей и плавность перехода от одного диаметра к другому.

Работа посвящена установлению возможности осуществления контроля структурного состояния волноводов-концентраторов медицинского назначения с учетом их размеров.

Так как исследуемые волноводы имеют большое отношение длины к диаметру на всех участках волновода, то для уменьшения влияния различных размагничивающих факторов намагничивание и перемагничивание осуществлялось в проходном датчике импульсным симметричным полем с амплитудой 20 кА/м при помощи прибора ИМИ-И [2].

В ходе исследования были рассмотрены образцы волновода следующих размеров: диаметром 1,75 мм и длиной 160 (1) и 140 мм (2); диаметром 1,95 мм и длиной 80 мм (3); диаметром 1,45 мм и длиной 160 мм (4). Внешний вид полученных петель магнитного гистерезиса показан на рис. 1. Как видно из рисунка, по внешнему виду петель сложно установить зависимости магнитных параметров от линейных размеров волноводов.

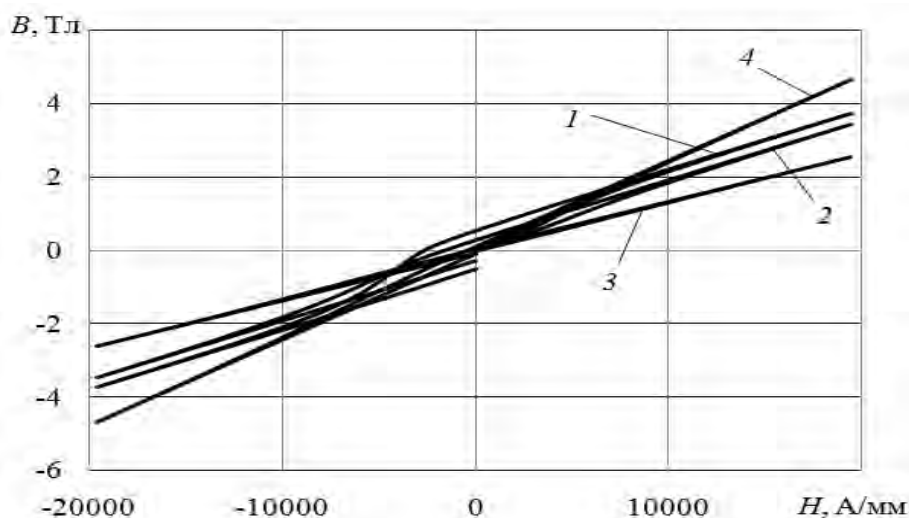


Рис. 1. Внешний вид петель магнитного гистерезиса для рассматриваемых образцов волновода

Для более подробного анализа поведения магнитных параметров, взятых по петле магнитного гистерезиса при импульсном намагничивании-перемагничивании, рассмотрены величины остаточной индукции и максимальной индукции, график зависимости которых от диаметра образца волновода представлен на рис. 2.

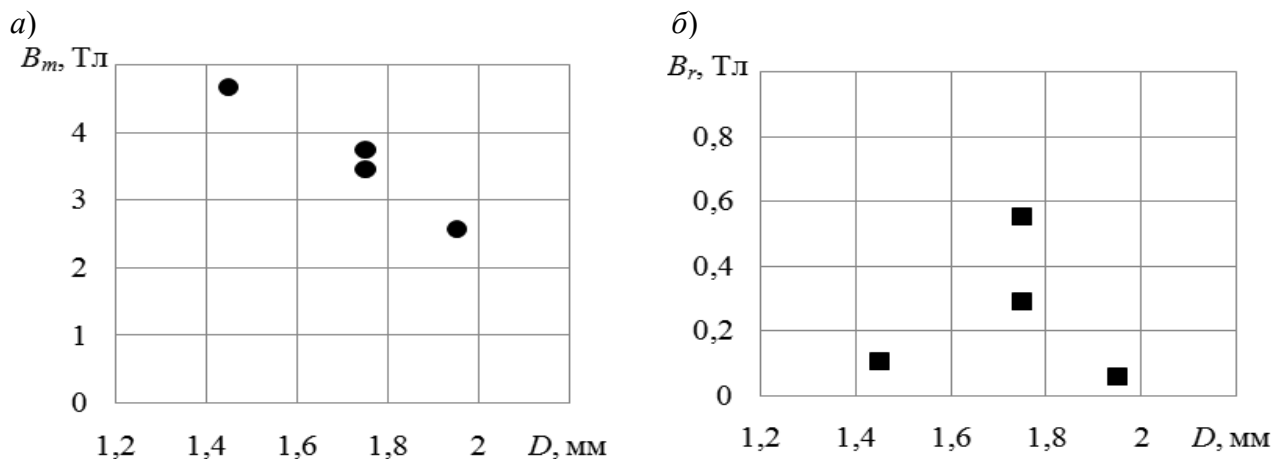


Рис. 2. Зависимость величины максимальной индукции (а) и остаточной индукции (б) от диаметра волновода

Как видно из рисунков, для максимальной индукции характерна линейная зависимость с хорошей чувствительностью от диаметра исследуемого отрезка волновода вне зависимости от длины этого отрезка. Для незначительно различающихся по длине средних участков волновода характерно также незначительное, не превышающее 10 %, различие величин максимальной магнитной индукции. Остаточная индукция ведет себя неоднозначно с изменением диаметра образцов волновода; разница между величинами остаточной индукции для одинаковых диаметров в относительных единицах значительна, однако в абсолютных равна разнице между величинами максимальной индукции.

Таким образом, по полученным результатам можно сделать вывод, что для исследования формы и структурного состояния волноводов магнитный импульсный метод является перспективным, а по основным магнитным характеристикам можно оценивать диаметральные размеры, однако необходимы дальнейшие исследования для определения оптимальных режимов намагничивания.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Минченя, В. Т.** Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В. Т. Минченя, Д. А. Степаненко // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 6–16.

2. **Короткевич, З. М.** Многопараметровая модель для контроля качества закалки инструментальной углеродистой стали У8А с использованием прибора ИМИ-И / З. М. Короткевич, А. А. Осипов, В. А. Бурак // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 2. – С. 38–45.

УДК 620.179.14/15

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗБРАКОВКИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СОВРЕМЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО И СЕРОГО ЧУГУНА МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

В. Н. БУСЬКО

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Задача разбраковки и неразрушающего контроля (НК) структуры, формы, распределения и количества графитовых включений в отливках и изделиях из чугуна в литейном производстве на металлургических предприятиях по-прежнему является актуальной. Качество чугунного литья зависит от механической прочности, которая достигается получением высокопрочного чугуна (ВЧ) с шаровидным графитом. В отличие от серого чугуна (СЧ) с пластинчатым графитом, ВЧ ввиду формы графита не является активным концентратором напряжений, как графитные включения в виде пластин, снижающими механическую прочность и пластичность.

Для НК и разбраковки изделий из чугунного фасонного литья используют металлографический метод [1], который является выборочным. Среди физических методов НК наиболее широко применяется: ультразвуковой метод [2, 3]; магнитоупругоакустический; электромагнитный и магнитный, к которым относятся коэрцитиметрический; по магнитной проницаемости и магнитошумовой (метод эффекта Баркгаузена (МЭБ)) [4], являющийся универсальным и высокочувствительным к любым изменениям магнитных свойств. В [5] установлено, что путем сравнения металлографического и ультразвукового методов, являющимися эталонными и базовыми, с МЭБ, последний может быть использован для разбраковки изделий из ВЧ и СЧ. Особенности МЭБ являются его высокая и управляемая чувствительность к физико-механическим свойствам поверхностных слоёв (до 1...1,5 мм), возможность проведения НК изделий без, или с минимальной степенью подготовки поверхности, высокие производительность измерения уровня полезного сигнала (интенсивности  $U_{эф}$  магнитного шума (МШ)) и чувствительность не только к степени графитизации, но и к металлической основе (матрице), состоящей из феррита, перлита или их комбинаций.

При изучении возможности разбраковки и оценки НК качества современных изделий из ВЧ и СЧ с помощью МЭБ использовались различные изделия чугунного фасонного литья (предоставлены лабораторией контактно-динамических методов контроля ИПФ НАНБ). Экспериментально изучалось влияние марки чугуна на уровень МШ.

Исследования возможности разбраковки ВЧ и СЧ проводились на готовых изделиях в виде шестерни диаметром 160 мм из чугуна ВЧ45-50 и изделия сложной формы № 2 из ВЧ, а также двух изделий из серого чугуна: СЧ30 (рычага тормоза) и направляющей из СЧ, с помощью двух типов накладных преобразователей Баркгаузена (ПБ1 и ПБ2), отличающихся техническими характеристиками, типоразмерами и условиями перемагничивания.

На рис. 1 показаны результаты разбраковки изделий с использованием обоих типов датчиков. Ввиду наличия неоднородности  $U_{эф}$  по изделию, например, для шестерни марки ВЧ45-50, её массогабаритов и конфигурации, измерения  $U_{эф}$  выполнялись в 38 точках, включая зубья (среднее значение  $U_{эф}$  по изделию 128,7 мВ), в изделии № 2 из ВЧ – в 20 точках ( $U_{эф} = 143,9$ ), в рычаге тормоза из СЧ30 – в 20 точках ( $U_{эф} = 70,9$ ), в направляющей из СЧ – в 12 точках ( $U_{эф} = 62,1$ ). Видно, что  $U_{эф}$ , как информативный параметр, позволяет осуществлять разбраковку изделий из ВЧ и СЧ обоими ПБ (с разной чувствительностью), что согласуется с полученными ранее данными [5].

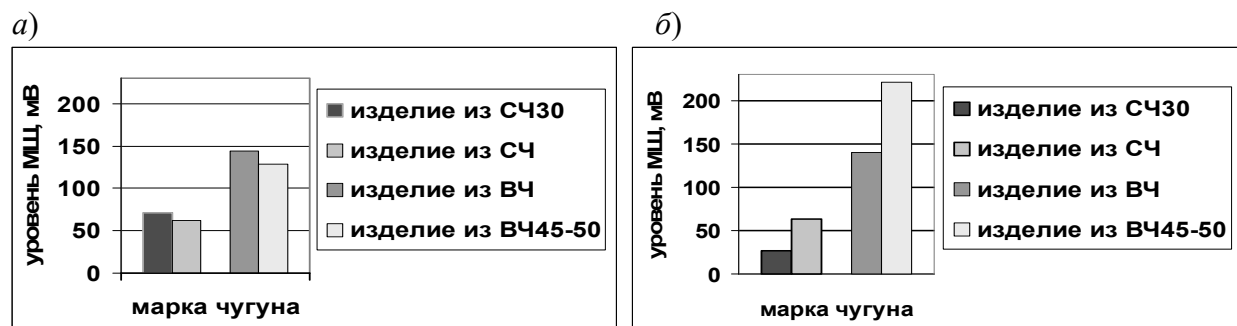


Рис. 1. Результаты разбраковки по маркам изделий из ВЧ и СЧ магнитошумовым методом для двух типов преобразователей Баркгаузена: *а* – ПБ1; *б* – ПБ2

Из сравнения показанных на рисунке гистограмм следует, что для изделий из ВЧ с шаровидным графитом  $U_{эф}$  значительно ( $\approx$  в 2,1 раза для ПБ1 и  $\approx$  в 2,9 раза для ПБ2) выше, чем для изделий из СЧ с пластинчатым графитом. Превышение интенсивности МШ в изделиях из ВЧ относительно СЧ обусловлено снижением количества зон концентраторов напряжений и тем, что ВЧ не ослабляет металлическую матрицу и имеет повышенную долю ферритной составляющей, в результате магнитные свойства изделий из ВЧ повышаются, что приводит к увеличению механической прочности при растяжении и изгибе. Результаты демонстрируют возможность использования МЭБ и магнитошумовой аппаратуры для разбраковки изделий и отливок из высокопрочного и серого чугуна и контроля их качества.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Москва: Гос. ком. СССР по стандартам, 1987. – 14 с.
2. Воронкова, Л. В. Контроль чугунных отливок ультразвуком / Л. В. Воронкова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 25 с.
3. Методы выявления несплошностей и контроль структуры чугунов с использованием объемных и головных волн / А. Р. Баев [и др.] // Литьё и металлургия. – 2004. – № 2. – С. 95–100.
4. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий (классификация видов и методов). – Москва: Изд-во стандартов, 1980. – 26 с.
5. Бусько, В. Н. Неразрушающий контроль изделий из высокопрочного чугуна методом магнитных шумов / В. Н. Бусько, В. Л. Венгринович, Б. А. Чепыжов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 10. – С. 30–36.

УДК 620.179

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА НА РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ TOFD-МЕТОДОМ

Е. Д. ВОРОНОВ, Р. А. ТОЛКАЧЕВ, С. С. СЕРГЕЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В настоящее время высокую информативность неразрушающего контроля основного металла и сварных соединений различных промышленных объектов обеспечивают современные ультразвуковые технологии, которые позволяют проводить дефектоскопию и дефектometriю с хорошими метрологическими характеристиками. Как правило, при обследовании объектов ультразвуковой контроль осуществляется при нормальной температуре материала объекта и окружающей среды. Однако существуют ситуации, когда необходимо выполнить контроль горячих материалов. Такая необходимость возникает в обрабатывающей промышленности и энергетике, когда контроль металлических резервуаров или труб проводится без вывода их из эксплуатации.

Сегодня особую популярность завоевывает дифракционно-временной метод (TOFD-метод) ультразвукового контроля, который позволяет определить истинные размеры дефектов типа несплошностей и их расположение в сварных швах.

Работа посвящена исследованию влияния температуры объекта на точность определения координат и размеров дефектов при реализации TOFD-метода.

В качестве объекта контроля был выбран реальный образец со стыковым сварным швом толщиной 16 мм, шириной и длиной 300 мм. В эксперименте использовалось сканирующее устройство ТНА-02 с парой установленных преобразователей с раздвижкой 40 мм.

Характеристики преобразователей FCN-60-UN-1: частота преобразователя – 5 МГц, угол наклона призмы –  $23,07^\circ$ , стрела преобразователя – 5 мм, угол ввода  $\alpha = 60^\circ$ , скорость призмы – 2360 м/с, путь центрального луча в призме – 10,68 мм.

Контроль производили прибором SyncScan Suprog сканированием вдоль сварного шва в режиме TOFD. Температура сварного образца измерялась пирометром UT302B.

В качестве настроечных образцов использовался контрольный образец с цилиндрическими отверстиями и пропилами. Настройку прибора производили при нормальной температуре, т. е. при  $22^\circ\text{C}$ .

Сварной образец поместили в контейнер и залили горячей водой и дискретно через  $10^\circ\text{C}$ , при остывании образца, сканировали его в температурном диапазоне от  $60^\circ\text{C}$  до  $22^\circ\text{C}$ .

В процессе сканирования сварного образца были выявлены четыре реальных дефекта: 1 – несплошность в виде поры; 2 – несплошность в виде трещины; 3 – несплошность в виде скопления пор; 4 – непровар в корне шва.

Полученные результаты эксперимента расшифрованы с помощью программы Supor Up. Программа позволяет определить глубину залегания дефекта, протяженность, а также координаты расположение дефекта от начала сканирования. По результатам контроля построены графики зависимости измеряемых параметров от температуры (рис. 1 и 2).

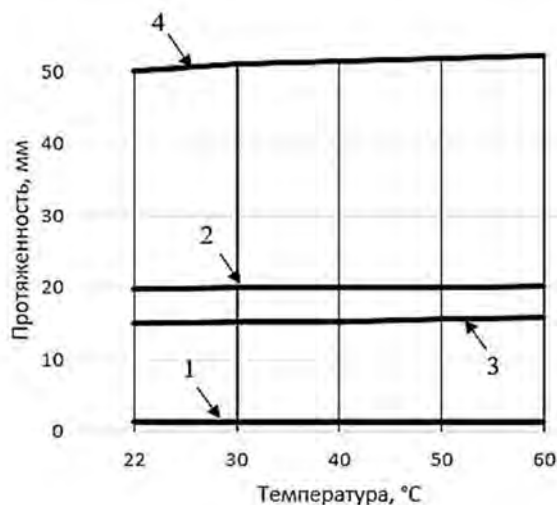


Рис. 1. График зависимости линейной протяженности различных дефектов от температуры

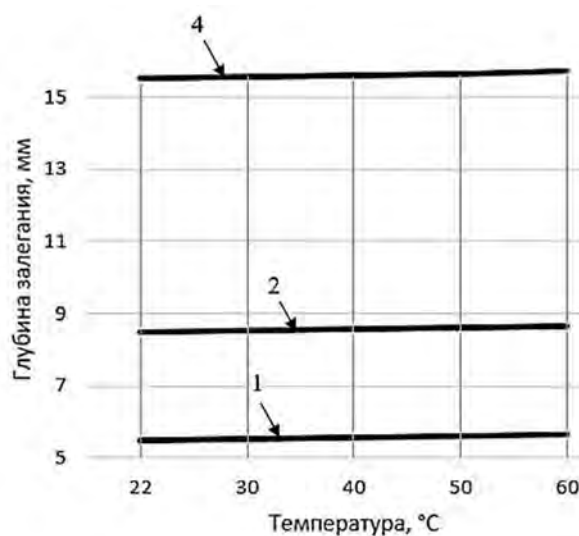


Рис. 2. График зависимости глубины залегания различных дефектов от температуры

Из графиков видно, что в рабочем диапазоне температур измеряемые параметры изменяются несущественно, однако имеется незначительный тренд к увеличению геометрических параметров с ростом температуры.

В докладе проведен анализ результатов экспериментов и даны определенные практические рекомендации по реализации TOFD-метода на нагретых объектах с целью минимизации погрешностей измерения основных параметров контроля.



УДК 539.3

## РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ, РАССЕЯННОГО В ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

К. А. ГОМЕЛЬКОВ, И. А. ЛАППО, А. В. ХОМЧЕНКО

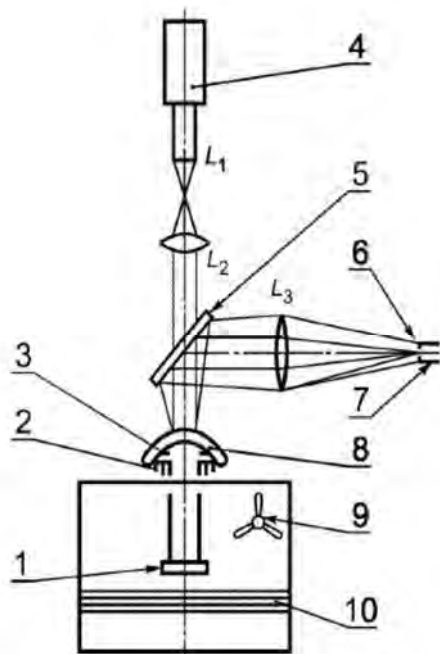
Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одной из важных задач при производстве и эксплуатации смотровых элементов защитных шлемов для пассажиров и водителей мотоциклов и мопедов и очковых стёкол средств индивидуальной защиты глаз является анализ и контроль их оптических параметров и их изменений. Ухудшение пропускания смотровых элементов вследствие рассеяния света на смотровых элементах существенным образом влияет на безопасность участников дорожного движения. Измерению интенсивности излучения, рассеянного в дисперсной среде, возникающей вследствие запотевания внутренней поверхности смотровых элементов защитных шлемов для пассажиров и водителей мотоциклов, и посвящена данная работа.

Измерение интенсивности излучения, рассеянного в дисперсной среде на поверхности смотрового элемента проводилось на установке, принципиальная схема и внешний вид которой представлены на рис. 1.

а)



б)



Рис. 1. Принципиальная схема установки (а) и внешний вид макета (б): 1 – зеркало; 2 – опорное кольцо; 3 – кольцо из мягкой резины; 4 – лазер; 5 – пластина светоделительная; 6 – диафрагма; 7 – фотоприемник; 8 – образец; 9 – вентилятор; 10 – водяная баня

В состав установки входит лазер, линзы, диафрагмы, опорное кольцо для установки образца, фотоприемник, измерительный прибор. Линзы  $L_1$  и  $L_2$  служат для расширения потока излучения лазера и направления его на зрительный (геометрический) центр испытуемого элемента 8. Линза  $L_3$  с фокусным расстоянием  $(373 \pm 5)$  мм создает изображение оптического центра испытуемого элемента 8 на фотоприемнике 7, световой диаметр линзы – 45 мм. Фотоприемник на основе соединений Si. Спектральный диапазон работы от 400 до 1200 нм. Круглая диафрагма на поверхности фотоприемника расположена на расстоянии  $(373 \pm 5)$  мм от линзы  $L_3$ . Диаметр окружности диафрагмы равен 10 мм. Приемная часть установки, включающая светоделительную пластину 5, диафрагму 6, фотоприемник 7, установлена на подвижной платформе и имеет возможность перемещения в трех направлениях относительно вертикальной оси, проходящей через оптический центр испытуемого образца. В качестве источника излучения применяют лазер, имеющий длину волны излучения 532 нм, световой диаметр пучка излучения 10 мм. При выборе длины волны источника излучения был учтен закон Рэля для рассеянного излучения в целях повышения чувствительности блока регистрации. Для создания дисперсной среды путем осаждения паров воды на поверхности смотрового элемента использована водяная баня 10.

Для измерения интенсивности рассеянного излучения измерялся коэффициент пропускания смотрового элемента. Для регистрации изменения коэффициента пропускания  $\tau_r^2$  смотровой элемент помещают на опорное кольцо и контролируют его изменение в течение некоторого времени, когда значение  $\tau_r^2$  уменьшится до 80 % начального значения этой величины. Коэффициент пропускания  $\tau_r^2$  вычисляют по формуле [1]

$$\tau_r^2 = \frac{\Phi_b}{\Phi_i},$$

где  $\Phi_i$  – световой поток до запотевания испытуемого смотрового элемента, определяемый как показания измерительного прибора фотоприемника, полученное в начальный момент времени после размещения смотрового элемента на опорное кольцо;  $\Phi_b$  – световой поток при наличии запотевания испытуемого смотрового элемента.

Так как луч света в соответствии со схемой установки дважды проходит через образец, то измерение коэффициента пропускания смотрового элемента означает определение  $\tau_r^2$ .

Таким образом, можно контролировать устойчивость к запотеванию смотровых элементов защитных шлемов для пассажиров и водителей мотоциклов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.4.230.2–2016. Средства индивидуальной защиты глаз. Методы испытаний оптических и неоптических параметров.

УДК 620.179.14

## МАГНИТНЫЙ ДЕФЕКТΟΣКОП СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

А. П. ГУСЕВ, И. Е. ЗАГОРСКИЙ

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Показателем эффективности применения магнитного метода диагностики состояния стальных канатов является большое количество модификаций, представленных на рынке различными производителями (Россия, США, Германия, Китай, Польша, Великобритания, Япония, Канада и др.) магнитных дефектоскопов, успешно применяемых для обнаружения разрывов проволок и потери сечения металла в результате коррозии и износа канатов. Технические характеристики средств контроля стальных канатов, определяемые конкретными условиями решаемых задач, имеют конструктивные особенности, различия по типам контролируемых канатов, по температурным диапазонам и др.

Однако все средства объединяет одно общее условие к процессу контроля – контроль при относительном движении каната и намагничивающего блока. В этом отношении большинство представленных на рынке средств контроля в соответствии с большим количеством практических задач ориентированы на диапазон малых скоростей – до 3 м/с, некоторые – до 4 м/с. Диапазон более скоростных магнитных дефектоскопов канатов ограничен (10 м/с).

С повышением надежности механизмов и их производительности возрастают и скорости движения канатов, например, на шахтных объектах. Из этого следует требование расширения скоростных диапазонов средств контроля.

При высокой скорости движения каната в зоне намагничивания, кроме искажения его намагниченности из-за коэрцитивной силы материала проволок и помех витой структуры, становится существенной модуляция намагниченности каната из-за возникновения импульсов вихревых токов высокой интенсивности. Возникающие при этом дополнительные помехи не только снижают чувствительность к дефектам, но и ограничивают предельную скорость контроля каната, при которой достигается достаточная достоверность обнаружения дефектов.

В связи с этим на основе выполненных научных исследований в Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан совместно с предприятием ООО «ПассатИнновации» (г. Солигорск) макет магнитного дефектоскопа круглых стальных канатов на диапазон скоростей до 15 м/с. Основные функциональные блоки дефектоскопа смонтированы в стальных полуцилиндрах. К ним относятся двухполюсная намагничивающая система, выполненная из наборов неодимовых постоянных магнитов, и центральные вставки между полюсами намагничивающей системы. Разработка схемы и конструкции макета основана на использовании изобретения [1].

Внешний вид макета дефектоскопа представлен на рис. 1.

Испытания макета дефектоскопа канатов на выявляемость дефектов проведены в лаборатории Металлофизики Института прикладной физики НАН Беларуси. В испытаниях использовались представленные Заказчиком стальные

канаты двух диаметров: 39 и 46 мм. На канатах имелись разрывы проволок, разрыв центрального провода, а для изменения сечения металла удалена часть пряди одной свивки. Полученные результаты иллюстрируются рис. 2 и 3.

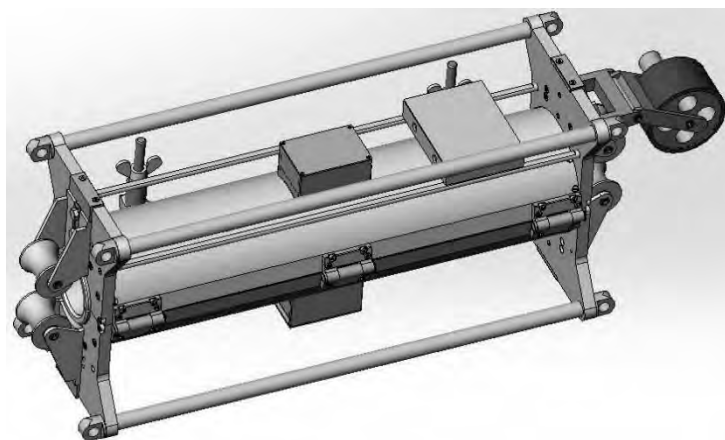


Рис. 1. Внешний вид макета магнитного дефектоскопа стальных канатов

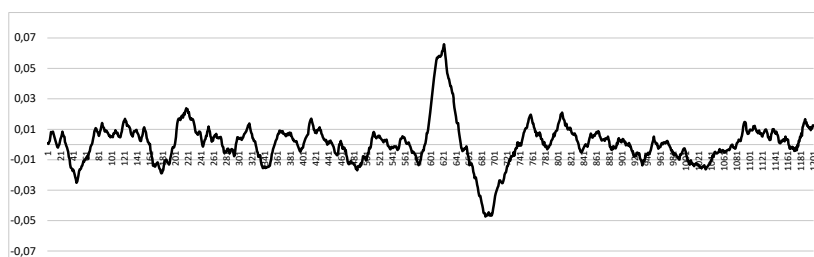


Рис. 2. Сигнал от дефекта – разрыв одной проволоки

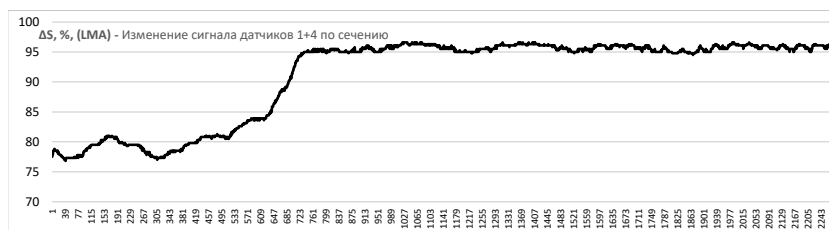


Рис. 3. Сигнал в зоне изменения сечения по металлу каната

Полученные при испытаниях дефектоскопа показатели по чувствительности к дефектам канатов и к изменению сечения металла находятся на уровне лучших, представленных на рынке, аналогичных средств контроля.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ неразрушающего контроля площади поперечного сечения протяженного ферромагнитного объекта и обнаружения локальных дефектов в нем и устройство для его осуществления: пат. ВУ 14543 / А. П. Гусев. – Опубл. 30.06.2011.

УДК 519.876.5:620.179.152.1:004.946

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИБКОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАДИОГРАФИИ

В. С. КУВШИННИКОВ, Е. Е. КОВШОВ,  
Д. В. ДМИТРИЕВ, В. Д. ДМИТРИЕВ

АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт  
монтажной технологии – Атомстрой»  
Москва, Россия

Среди широко используемых цифровых технологий выделяются цифровые тренажеры-симуляторы на основе виртуальной реальности, расширяющие диапазон образовательных возможностей и повышающие качество усвоения материала в различных областях знаний за счет более глубокого «погружения» в процесс обучения. Основной задачей при применении технологий виртуальной реальности в рамках программ подготовки квалифицированных технических специалистов по неразрушающему контролю является развитие их профессиональных навыков, формирование устойчивых шаблонов поведения, обеспечивающих, в том числе, неукоснительное соблюдение правил и требований промышленной безопасности.

Применение гибких свойств чувствительных детекторов в промышленной радиографии позволяет упростить процесс технологической подготовки, экспонирования и расшифровки конечного изображения, повысить информативность получаемых выходных данных. Одним из наиболее значимых достоинств гибких детекторов является выдержка при их экспонировании, которую удастся сократить в соответствии с меньшим расстоянием от объекта контроля до поверхности детектора.

При формировании проекции объектов на плоскость программное обеспечение для трехмерных графических вычислений выполняет ряд последовательных линейных алгебраических преобразований, предоставляя программам-шейдерам входные данные об относительном и/или абсолютном расположении обрабатываемых вершин и фрагментов. В общем случае этот процесс включает преобразования координат из системы координат объекта в глобальную систему, затем в систему координат наблюдателя, а на завершающем этапе – в систему координат экрана-проекции.

Пересчет геометрических параметров модели детектора выполняется в несколько этапов, приведенных на схеме алгоритма (рис. 1). После пересчета модели каждому сегменту в соответствие ставится участок отдельной плоскости проекции, соответствующий одной из виртуальных камер обзора.

Требуемые плоскость и участок могут быть заданы как путем модификации матрицы проекции при неподвижном ракурсе, так и гибридным путем. Гибридный подход выглядит предпочтительнее, поскольку умножение на матрицу ракурса производится в любом случае, а матрица проекции при этом упрощается. Алгоритм, соответствующий изложенному, приведен на рис. 2.



Рис. 1. Алгоритм пересчета геометрии модели детектора



Рис. 2. Алгоритм пересчета параметров проецирования изображения

Последний этап представленного алгоритма необходим для формирования слитного изображения (текстуры) и предполагает выделение каждому сегменту модели детектора и каждой соответствующей камере – отдельного прямоугольного участка на едином слитном изображении, куда будет выполняться запись полученной проекции изображения объектов виртуальной сцены.

Результат, полученный в имитационной модели для среды виртуальной реальности, приближен к геометрически достоверному изображению, сформированному на гибком (изогнутом) детекторе. При этом удастся достичь ожидаемых качественных изменений результатов, сопоставимых с практическими результатами выполнения радиационного контроля.

УДК 620.179.14

## ВНУТРЕННЯЯ КОМПЕНСАЦИЯ И ВЫБОР МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

В. Н. КУЛАГИН, В. А. БУРАК, А. А. ОСИПОВ  
Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Для оценки надежности оборудования и величины ошибки восстановления данных по многопараметровым моделям при их сравнении следует проводить кропотливый анализ, учитывая погрешности определения непосредственно значимых величин, влияющих на качество производимой продукции. Наиболее надежно проводить сравнение на изделиях, непосредственно изготавливаемых на производстве, но это требует значительных временных и финансовых затрат, что может быть невыполнимым в конкретной ситуации контроля.

В [1] рассмотрены многопараметровые модели, которые предложены авторами [2]. При расчетах коэффициентов моделей использовались экспериментальные данные из [3]. Модели построены с использованием шести магнитных параметров: коэрцитивная сила  $H_c$ ; релаксационная намагниченность  $M_{H_r}$ ; релаксационная магнитная восприимчивость  $\chi_r = M_{H_r}/H_r$ ; квадрат коэрцитивной силы  $H_c^2$ ; квадрат релаксационной намагниченности  $M_{H_r}^2$ ; произведение релаксационной магнитной восприимчивости на релаксационную намагниченность  $\chi_r \cdot M_{H_r}$ .

Однако, если отдельно учитывать погрешности измеряемых величин, то модели упростятся до трех независимых параметров: коэрцитивная сила  $H_c$ ; релаксационная намагниченность  $M_{H_r}$  и релаксационная коэрцитивная сила  $H_r$ .

Для твердости и температуры отпуска получаем выражения

$$\delta_{HRC} = -0,23 \cdot \delta_{H_c} - 1,06 \cdot \delta_{M_{H_r}} + 1,17 \cdot \delta_{H_r}; \quad (1)$$

$$\delta_{T_o} = -5,5 \cdot \delta_{H_c} + 56,2 \cdot \delta_{M_{H_r}} - 27,1 \cdot \delta_{H_r}. \quad (2)$$

Использовались магнитные характеристики образцов стали 45 (закалка при 860 °С; отпуск при температурах от 20 °С до 650 °С) [3]. Выражения (1) и (2) получены для температуры отпуска  $T_{o.u.} = 300$  °С.

Оценку выполним по экспериментальным данным [3]. Согласно им для стали 45 при температуре отпуска 300 °С твердость  $HRC$  равна 45 единиц. То есть в данном случае при сравнении уравнения (1) для твердости с уравнением (2) для температуры отпуска коэффициент пересчета (нормировки), дающий оценку надежности вычислений по (2) при сравнении с (1), равен 6,67. Тогда из выражения (2) получаем новое выражение (3), которое более объективно сравнивать с (1):

$$\delta_y = -0,83 \cdot \delta_{H_c} + 8,43 \cdot \delta_{M_{H_r}} - 4,1 \cdot \delta_{H_r}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) видно, что коэффициенты значимости погрешностей по абсолютной величине в последнем случае (для температуры отпуска) в несколько раз выше. То есть приоритет должен быть отдан использованию уравнения (1) модели для твердости.

В качестве примера рассмотрим возможность использования этих же моделей при другой температуре отпуска. Так, для стали 45 при температуре отпуска 650 °С твердость *HRC* равна 20 единиц. В этом случае при сравнении уравнения (1) для твердости с уравнением (2) для температуры отпуска коэффициент пересчета равен 32,5. Тогда из выражения (2) получаем новое выражение

$$\delta_y = -0,17 \cdot \delta_{H_c} + 1,73 \cdot \delta_{M_{H_r}} - 0,83 \cdot \delta_{H_r}. \quad (4)$$

Из сравнения (1) и (4) следует, что коэффициенты значимости погрешностей по абсолютной величине различаются только на несколько десятков процентов. Причем в последнем случае (для температуры отпуска) меньшими по величине оказались два коэффициента значимости мультипликативных ошибок при  $\delta_{H_c}$  и  $\delta_{H_r}$ . То есть больший приоритет (по числу параметров модели) имеет использование уравнения (2) для модели, построенной по данным температуры отпуска.

Проведенное сравнение моделей показало, что необходимо учитывать существенное изменение приоритетов использования моделей в зависимости от температур отпуска и твердости, поскольку в несколько раз изменяется коэффициент пересчета. Использование моделей в таком широком интервале изменения температуры и твердости представляется сомнительным.

На реальном производстве интервал существенно уже, но тогда и нормировка (тем или иным образом) должна это учитывать. При таком контроле важно само отклонение значений от идеальных (установленных соответствующей нормативной документацией). То есть для увеличения надежности неразрушающего контроля необходимо проводить дополнительные исследования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка регрессионных многопараметровых моделей в задачах магнитного неразрушающего контроля / А. А. Осипов [и др.] // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2018. – № 4. – С. 32–44.
2. **Бида, Г. В.** Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Г. В. Бида, А. Н. Сташков // *Дефектоскопия*. – 2003. – № 4. – С. 67–74.
3. **Бида, Г. В.** Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 219 с.



УДК 620.179.14

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ МАГНИТОГРАФИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В. Г. ПАНТЮШИНА, В. А. НОВИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Чтобы разработать универсальную методику магнитографического контроля ферромагнитных объектов проанализируем и обобщим способы повышения достоверности магнитографического контроля ферромагнитных объектов.

Анализ литературных источников, включая патенты на изобретения, показал, что повышение достоверности контроля может быть достигнуто:

- вследствие увеличения отношения амплитуд сигнал/шум за счет: увеличения амплитуды полезного сигнала, обусловленного дефектом, благодаря записи полей дефектов на более крутом участке ветви поляризованной магнитной ленты; реализации принципа отдельного контроля швов, учитывающего конструктивно-технологические особенности шва, тип и вид дефектов; применения концентраторов магнитной индукции; намагничивания объекта перед укладкой ленты по несимметричным петлям магнитного гистерезиса до установившегося цикла; уменьшения магнитного сопротивления начального и конечного участков шва объекта; укладки ленты вдоль направления предполагаемого распространения дефекта при контроле на остаточной намагниченности объекта, а также уменьшения помех, вызванных выпуклостью шва, поверхностными неровностями, структурными и химическими неоднородностями;

- за счет ввода новых информативных параметров (сигнал двуполярный кососимметричный или несколько искаженный однополярный) при намагничивании объекта перемещаемым постоянным магнитом через ленту, чтобы отличить опасные дефекты (трещины и узкие несплавления) от широких несплавлений и углублений от поверхностных неровностей;

- повышения разрешающей способности метода за счет выбора направления намагничивания или его режима;

- повышения точности определения координат расположения дефекта в объекте независимо от глубины его залегания;

- разработки способов определения глубины залегания и величины несплошности;

- ограничения толщины стенки контролируемого сварного объекта только теми областями, в которых дефект обнаруживается однозначно или неоднозначно с возможностью завышения величины;

- косвенного способа определения отсутствия непровара в односторонних сварных соединениях по наличию помех, вызванных обратной выпуклостью шва при полном проплавлении свариваемых деталей;

- за счет изменения положения рабочей точки характеристики магнитной ленты, чтобы запись полей дефектов происходила на более крутом участке.

УДК 620.179.14

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В ЗОНЕ ОСТАЮЩЕЙСЯ ПОДКЛАДКИ  
ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

В. Г. ПАНТЮШИНА, В. А. НОВИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Односторонние стыковые сварные соединения, выполненные на остающейся подкладке, весьма часто встречаются в ответственных металлоконструкциях [1]. Наличие подкладки позволяет производить сварку на повышенных токовых режимах, что гарантирует полное проплавление соединяемых деталей и исключает появление непровара в корне шва.

В работе оценен вклад остающейся подкладки в формировании суперпозиции полей на поверхности сварного соединения при поперечном намагничивании шва. Исследования выполняли расчетным путем для случаев, когда выпуклость шва на наружной стороне соединения отсутствует и при ее наличии (поверхность выпуклости шва в плоскости, перпендикулярной его продольной оси, аппроксимировали параболой). Определяли тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля, создаваемого подкладкой.

В ходе выполнения расчетов приняты следующие допущения. Остающаяся подкладка плотно прилегает к обратной стороне соединяемых пластин, зазор между подкладкой и поверхностью объекта отсутствует, ее боковые грани перпендикулярны поверхности и параллельны друг к другу. Вектор напряженности внешнего намагничивающего поля перпендикулярен боковым граням подкладки. Расчет выполнен методом «магнитных зарядов». При его выполнении использовали формулы, полученные для поля протяженного дефекта, аппроксимированного полем ленточного магнитного диполя [2], однако со знаком минус, т. к. на выступающих гранях подкладки в отличие от граней несплошности образуются «магнитные заряды» противоположного знака. Находили характер изменения отношения  $H_x/2\sigma_n$  поперек подкладки, где  $\sigma_n$  – поверхностная плотность «магнитных зарядов».

Полученные зависимости  $(H_x/2\sigma_n) = f(x)$  для обоих случаев показали, что на топографию тангенциальной составляющей поля подкладки сильное влияние оказывают ширина и толщина подкладки, толщина свариваемых деталей. При увеличении ширины подкладки и толщины стенки объекта  $H_x/2\sigma_n$  уменьшается.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 37 с.
2. Зацепин, Н. Н. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.

УДК 681.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБИННОГО РАСХОДОМЕРА С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Е. В. ПОЗДНЯКОВА, В. Ф. ПОЗДНЯКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Использование волоконно-оптических преобразователей (ВОП) в расходомерах турбинного типа позволит значительно повысить достоверность результатов измерения на малых расходах и значительно увеличить помехоустойчивость к воздействию электромагнитных помех.

Для подтверждения возможности использования ВОП в турбинных расходомерах и оценки отдельных метрологических характеристик проведены натурные исследования макета турбинного расходомера с разными ВОП.

Проводились исследования с дискретными преобразователями в виде двух линеек, расположенных вдоль линии образующей лопатки турбинки и в виде моносветовода диаметром 0,6 мм в полимерной оболочке.

В качестве источника излучения использовался инфракрасный светодиод АЛ 107Б, а приемника излучения – фотодиод ФД256. При использовании дискретного преобразователя фотодиод и светодиод стыковались с входным и выходным торцами дискретов непосредственно без дополнительных оптических элементов. При использовании моносветовода излучение светодиода вводилось в световод посредством положительной линзы через светоделительный элемент. Излучение, отраженное от торца лопатки, по моносветоводу поступало на светоделительный элемент, частично отражалось и с помощью положительной линзы направлялось на чувствительную поверхность фотодиода.

Используемый фотодиод работал в фотогенераторном режиме, поэтому дополнительного источника питания не требовалось. Фотодиод подключался непосредственно ко входу цифрового осциллографа.

Колесо турбинки было прикреплено к валу электродвигателя постоянного тока, частота вращения которого регулировалась посредством изменения напряжения питания.

Экспериментально определялись амплитуды выходного сигнала с фотоприемника в зависимости от геометрического расположения торца ВОП от торца лопатки турбинки и зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты вращения турбинки.

При использовании дискретного ВОП амплитуда выходного сигнала с выхода фотодиода достигала 60 мВ и не зависела от частоты вращения турбинки. При использовании ВОП в виде моносветовода амплитуда выходного сигнала составляла 4 мВ.

Таким образом, экспериментально подтвердилась возможность применения разных типов ВОП в качестве вторичных преобразователей в турбинных расходомерах.

УДК 004.942

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Е. Н. ПРОКОПЕНКО, С. А. ПРОКОПЕНКО, А. Н. ПРУДНИКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Техническое диагностирование является одним из этапов контроля функционирования промышленных технологических установок (резервуары, сосуды, железнодорожные цистерны, трубопроводы и т. д.). При проведении технического диагностирования сотрудникам и экспертам необходимо обработать более тысячи значений различных параметров (температура, толщина, давление и т. д.). Ошибки, полученные на данном этапе, могут привести к неверному определению технического состояния технологической установки, что в будущем может привести к техногенным авариям, человеческим жертвам, экономическим потерям и экологической катастрофе.

Одной из причин возникновения ошибок при проведении технического диагностирования являются «ошибки ввода данных», возникающие при считывании результатов измерения с приборов или при вводе данных в информационные системы, связанные с усталостью или невнимательностью специалиста, повреждением используемых контрольно-измерительных устройств, неправильно подобранной методикой измерения, ошибками при передаче данных [1].

Современные информационные технологии позволяют применять нейронные сети для решения большого количества задач (распознавание образов, обработку большого количества разнородной разнокачественной информации, прогнозирование и т. д.). Нейронные сети являются мощным инструментом машинного обучения, способным обрабатывать и анализировать большие объемы данных и выявлять сложные закономерности. Для решения проблемы «ошибки ввода данных» возможно применение различных типов нейронных сетей:

– полносвязные нейронные сети являются одними из самых простых типов нейронных сетей, где каждый нейрон в одном слое соединен со всеми нейронами в следующем слое, хорошо подходят для решения задач классификации и прогнозирования;

– рекуррентные нейронные сети могут использоваться для работы с последовательными данными, структура сети позволяет запоминать предыдущие состояния и учитывать контекст при обработке данных;

– глубокие нейронные сети с большим числом слоев, позволяют извлекать сложные и абстрактные характеристики из данных и иметь большую точность, но такие сети требуют большего количества данных для обучения и более сложную настройку.

Применение одного из типов нейронной сети для решения данной проблемы невозможно, т. к. каждый тип сети имеет свои особенности и ограничения. Один тип нейронной сети может быть хорошо подходящим для определения ошибки,

связанной с неисправностью контрольно-измерительных устройств, но плохо подходящим для выявления ошибок, связанных с передачей данных.

Конструкторы нейронных сетей позволяют использовать для решения одного типа задач сразу несколько типов нейронных сетей, обеспечивая гибкость и быстроедействие. Применение комбинированного подхода использования нейронных сетей (полносвязных, рекуррентных и глубоких) для анализа поступающих данных позволяет выявлять «ошибки ввода данных», возникающие при проведении технического диагностирования.

Для минимизации и выявления «ошибок ввода данных» при проведении технического диагностирования разработан модуль проверки данных с применением языков программирования PHP (фреймворк Phalcon), JavaScript (фреймворк ReactJS), Python (библиотека Keras), который предоставляет возможность:

- ввода допустимого диапазона значений. Если измеряемое значение параметра выходит за пределы заданных границ (к примеру, толщина не может быть отрицательной), то модуль выдает предупреждение, указывающее на возможное нарушение в данных;

- проверки согласованности данных. Одним из преимуществ нейронных сетей является способность обнаруживать сложные зависимости и взаимосвязи в данных. Например, если один параметр указывает на повышенную температуру, а другой параметр указывает на нормальное давление, то модуль выявляет такую несогласованность и предупреждает о возможной ошибке;

- обрабатывать большие объемы поступающей информации. Современные подходы к обработке данных, а также аппаратные возможности, позволяют получать и анализировать большие потоки разнородных данных, предоставляя результат в кратчайшие сроки;

- сравнения с предыдущими результатами. Если поступающие значения существенно отличаются от прогнозируемых или предыдущих результатов, то модуль выдает предупреждение;

- проверки на наличие аномалий, позволяющие использовать алгоритмы анализа данных для выявления аномалий или выбросов. Если обнаруживаются необычные или «неправдоподобные» значения, модуль выдает предупреждение о возможной ошибке.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modeling of Industrial and Technological Processes in Complex Systems Based on NeuroFuzzy Petri Nets / A. V. Bobryakov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021), Vladivostok, 7–8 October 2021. – Vladivostok, 2021. – Vol. 2096.

УДК 620.179.14

АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ  
РАЗМЕРНОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Магнитные свойства многих сталей связаны с их структурным состоянием (коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагниченность  $M_r$ ) и фазовым составом (намагниченность  $M_s$  технического насыщения). Это явилось физической основой магнитного структурно-фазового анализа [1, 2]. Относительная погрешность  $\delta$  измерения  $H_c$  составляет  $\pm 2\%$ ,  $\delta$  измерения  $M_{rs}$  и  $M_s$  не превышает  $\pm 3\%$ , а  $\delta$  отношения  $K_{II} = M_{rs}/M_s$  не превышает  $\pm 1\%$  [3]. Установлены зависимости влияния селективного изменения разных структурных факторов сталей на их  $H_c$  [1, 2]. Но  $H_c$  оказалась непригодна для контроля температуры  $T_o$  отпуска закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более  $0,3\%$  из-за их слабой и неоднозначной зависимости от  $T_o$  в области  $400\text{ }^\circ\text{C} \dots 600\text{ }^\circ\text{C}$ . Но большинство изделий подвергается отпуску именно в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки изделий из таких материалов стала одной из главных задач магнитного структурного анализа.

Для решения этой проблемы, в числе прочих магнитных параметров сталей, исследователями предложено измерять и параметры, имеющие размерность магнитного поля: поле  $H_{\text{int}}$ , соответствующее максимальной магнитной проницаемости материала, его релаксационную коэрцитивную силу  $H_r$ . Автором показано [4–8], что результаты измерения этих параметров не нашли применения в магнитном структурном анализе из-за низкой точности измерения и тесной связи с коэрцитивной силой материала, которая может быть измерена проще и точнее.

Современные исследователи предложили в качестве параметра, чувствительного к структуре сталей, использовать критическое поле  $H_{кр}$ , которое определяли путем построения касательных к измеренной кривой безгистерезисной кривой намагничивания материала от нулевого и от максимального полей, как абсциссу их пересечения [9, 10].

В докладе, на основании разработанного аналитического описания безгистерезисной кривой намагничивания материала [11], показано, что и

предложенный в [9, 10] к измерению магнитный параметр  $H_{кр}$  может быть рассчитан по результатам простого и точного измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ .

Тем самым подтвержден сделанный в [8] вывод, что структурная чувствительность параметров, синтезированных из  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  сталей выше структурной чувствительности магнитных проницаемостей и релаксационных магнитных параметров и результатов измерения магнитных параметров, имеющих размерность напряженности магнитного поля, а измерены они могут быть проще и точнее. Любой необходимый магнитный параметр материала изделий или любая их комбинация могут быть синтезированы из результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михеев, М. Н.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. – Москва: Наука, 1993. – 252 с.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева // Магнитные методы контроля. – Москва: Машиностроение, 2006. – Т. 6, кн. 1. – 848 с.
3. Магнитные измерения / Е. Т. Чернышев [и др.]. – Москва: Изд-во стандартов, 1969. – 248 с.
4. **Сандомирский, С. Г.** Анализ погрешности измерения поля максимальной магнитной проницаемости / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2011. – № 12. – С. 41–44.
5. **Сандомирский, С. Г.** Оценочный расчет магнитного поля, при котором магнитная проницаемость достигает максимума / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2012. – № 7. – С. 55–60.
6. **Сандомирский, С. Г.** Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала / С. Г. Сандомирский // Электричество. – 2010. – № 7. – С. 55–58.
7. **Сандомирский, С. Г.** Анализ диапазона изменения релаксационной коэрцитивной силы сталей / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2013. – № 2. – С. 47–51.
8. **Клюев, В. В.** Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В. В. Клюев, С. Г. Сандомирский. – Москва: Спектр, 2017. – 248 с.
9. **Сербин, Е. Д.** О возможности оценки магнитоотрицательных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам / Е. Д. Сербин, В. Н. Костин // Дефектоскопия. – 2019. – № 5. – С. 31–36.
10. **Сербин, Е. Д.** Определяемые формой петли гистерезиса критические поля, как перспективные параметры структуроскопии стальных изделий. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей при их магнитном контроле / Е. Д. Сербин, В. Н. Костин // Умные технологии НК. Единство теории и практики: сб. тр. XXIII Всерос. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 23–25 окт. 2023 г. – Москва: Спектр, 2023. – С. 68–72.
11. **Сандомирский, С. Г.** Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 55–60.

УДК 681.7.068

## ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД С ВНУТРЕННИМ ГОФРОМ КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СЕНСОРОВ

Л. И. СОТСКАЯ<sup>1</sup>, Д. В. ПОНКРАТОВ<sup>2</sup>, А. В. ШИЛОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусско-Российский университет<sup>2</sup>Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова  
Могилев, Беларусь

Практический интерес представляют компактные волноводные терагерцовые (ТГц) сенсоры. В докладе рассматриваются брэгговские структуры в виде прямоугольного металлического волновода с внутренним диэлектрическим гофром (рис. 1). При заполнении сердцевины таких волноводов исследуемой средой сенсорный эффект будет максимально выражен благодаря резонансному пропусканию структуры. Известные способы расчета подобных структур [1] используют приближение слабонеоднородной среды, которое для ТГц-диапазона неприемлемо. Авторами для этой цели разработан новый эффективный метод.

На рис. 1 область сенсора, заполняемая исследуемой жидкой либо газовой средой, представляет собой бокс со стороной  $a$  и высотой  $b$ , изолированный от среды, заполняющей регулярный волновод в областях  $z < 0$  и  $z > L$  пробками толщиной  $w_0$ , выполненными из того же материала, что и диэлектрический гофр в области сенсора. Гофр имеет  $NP$  периодов.

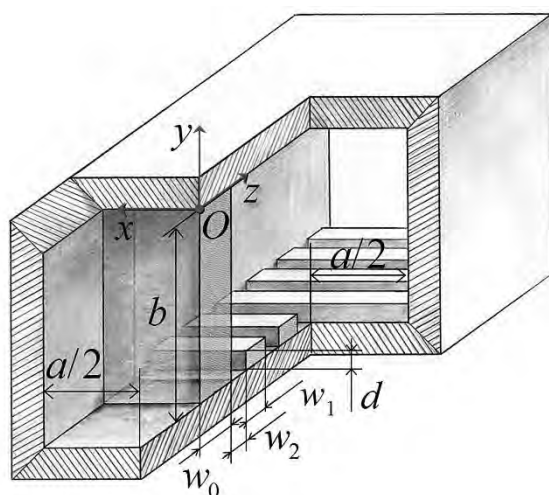


Рис. 1. Конфигурация исследуемых волноводов

Для проведения расчетов целесообразно учесть явный вид полей мод в частичных областях. Особым является случай, когда поле на регулярных и нерегулярных участках волновода имеет ТЕ-поляризацию с однородным вдоль оси  $Ox$  пространственным распределением. Этот случай представляет и основной практический интерес, поскольку может быть реализован при падении на



нерегулярный участок волновода его основной моды, допускающей эффективное торцевое возбуждение. Для расчета мод частичных областей структуры эффективен метод вариационного разделения переменных [2].

Пусть на вход нерегулярного участка поступает основная ТЕ-мода регулярного волновода. Тогда энергетические коэффициенты отражения и прохождения для этого участка равны

$$R = \beta_1^{-1} \sum_{j=1}^r \beta_j |(C_i^-)_j|^2; \quad T = \beta_1^{-1} \sum_{j=1}^r \beta_j |(C_o^+)_j|^2, \quad (1)$$

где  $r$  – порядок редукции спектральных разложений;  $(C_i^-)_j$  – амплитуды отраженных от нерегулярного участка волновода мод на входе нерегулярного участка волновода;  $(C_o^+)_j$  – амплитуды мод, прошедших нерегулярный участок;  $\beta_j$  – постоянные распространения мод.

Для расчета коэффициентов (1) разработана техника, основанная на перемножении клеточных передаточных матриц, выражающихся через интегралы перекрытия мод частичных областей структуры. Установлено, что при сантиметровой протяженности сенсорного участка гофрированная структура может повысить чувствительность газоанализатора в 20 раз по сравнению с его классическим абсорбционным аналогом.

Табл. 1 иллюстрирует внутреннюю сходимость развитого расчетного метода при  $NP = 5$ . В качестве диэлектрической среды выбран сополимер циклических олефинов (патентованное название Toras). Таблица относится к случаю заполнения сенсора сухим воздухом,  $a = b = 3500 \mu\text{m}$ ,  $w_0 = 0 \mu\text{m}$ ,  $w_1 = w_2 = 200 \mu\text{m}$  и частоте  $f = 0,55 \text{ THz}$ .

Табл. 1. Внутренняя сходимость метода в случае  $d = 200 \mu\text{m}$

$r$	$R$	$T$	$R + T$
1	0,4419	$4,1 \cdot 10^{-22}$	0,4419
5	27,9086	0,9629	28,8715
10	0,0340	0,9910	1,0250
15	0,0076	0,9922	0,9998
20	0,0069	0,9930	0,9999
25	0,0069	0,9930	0,9999

*Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ярив, А.** Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – Москва: Мир, 1987. – 616 с.
2. **Сотский, А. Б.** Теория оптических волноводных элементов: монография / А. Б. Сотский. – Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова, 2011. – 456 с.

УДК 535.243.2

## ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ ДРУДЕ ПРИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ ЗОЛОТЫХ ПЛЕНОК

Л. И. СОТСКАЯ<sup>1</sup>, Е. А. ЧУДАКОВ<sup>2</sup>, А. Б. СОТСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет

<sup>2</sup>Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова  
Могилев, Беларусь

Золотые пленки на диэлектрических и полупроводниковых подложках находят многочисленные применения в микроэлектронике, оптике и медицине. Для ряда приложений необходим прецизионный контроль оптических параметров золотых пленок. Как правило, он осуществляется методами спектрофотометрии, либо эллипсометрии при описании электродинамических свойств металла посредством комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_n(\lambda)$ . В инфракрасном (ИК) диапазоне изменения длины волны  $\lambda$  для  $\epsilon_n(\lambda)$  обычно используется классическая модель Друде. Она предполагает локальную связь между плотностью тока и напряженностью электрического поля в металле. Однако в условиях, когда толщина скин-слоя сопоставима с  $\lambda$ , либо с толщиной пленки  $d$ , данное допущение является проблематичным.

Более корректное описание взаимодействия света с металлом возможно в рамках теории аномального скин-эффекта, подразумевающей совместное решение уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана. Авторами разработан вариант такой теории, сводящий задачу к решению интегральных уравнений Фредгольма второго рода относительно напряженности электрического поля в металле. В ИК-диапазоне модель содержит пять свободных параметров  $d$ , плотность электронного газа  $n$ , время релаксации  $\tau$ , вероятность зеркального отражения электрона от границы раздела «пленка – подложка»  $p_1$  и аналогичную вероятность  $p_2$  для границы раздела «пленка – покровная среда». Разработан алгоритм численного решения уравнений, основанный на методе квадратур. На его основе проведена обработка литературных данных по спектральной эллипсометрии золотых пленок на кремниевой подложке. В результате определены значения  $n = 5,46 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3$ ,  $\tau = 9,16 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ . В работе они использованы для моделирования спектрофотометрического эксперимента. В нем на основании теории аномального скин-эффекта выполнен строгий расчет спектров энергетического коэффициента отражения плоских волн  $R(\lambda)$  при их нормальном падении на структуру «золотая пленка – кварцевая подложка из воздуха» (рис. 1, а). Вычисления выполнены при  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = 0$ ,  $p_2 = 1$ . Найденные спектры  $R(\lambda)$  обработаны по модели Друде с целью определения  $n$ ,  $\tau$  и спектра  $\epsilon_n(\lambda)$  для золота. Результаты представлены на рис. 1, б и в табл. 1.

Согласно представленным данным, использование модели Друде при решении обратной задачи спектрофотометрии золотых пленок имеет недостаток, состоящий в зависимости констант металла от толщины пленки. В частности,

$|\text{Im}\epsilon_n(\lambda)|$  монотонно возрастает при уменьшении  $d$  (см. рис. 1, б). Аналогичная картина отмечалась в ряде экспериментальных работ по спектрофотометрии и эллипсометрии металлических пленок. Модель Друде не учитывает также влияние на измеряемые спектры вероятностей  $p_1$  и  $p_2$  (см. рис. 1, а). Отмеченные трудности устраняются при решении обратных оптических задач на основании модели аномального скин-эффекта.

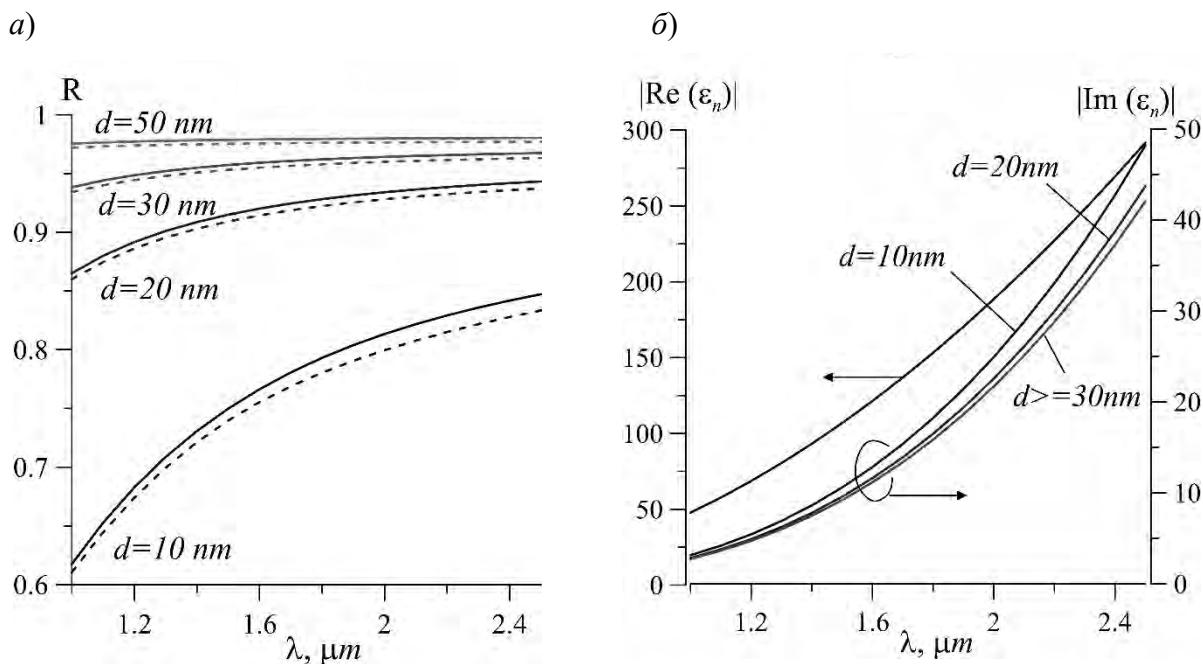


Рис. 1. Результаты вычисления: *a* – спектры отражения  $R(\lambda)$  от золотых пленок различных толщин при  $p_2 = 0$  (штриховые кривые) и  $p_2 = 1$  (сплошные кривые); *б* – восстановление  $\epsilon_n(\lambda)$  по модели Друде при  $p_2 = 1$  (графики  $|\text{Re}\epsilon_n(\lambda)|$ , соответствующие различным  $d$ , визуально совпадают)

Табл. 1. Восстановление  $n$ ,  $\tau$  по модели Друде

$d$ , nm	$p_2$	$n$ , $10^{-28} \cdot 1/\text{m}^3$	$\tau$ , $10^{15} \cdot \text{s}$
10	1	5,34	8,03
	0	5,34	6,51
20	1	5,32	8,85
	0	5,30	7,61
30	1	5,29	9,17
	0	5,27	7,92
50	1	5,29	9,17
	0	5,11	8,08

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

УДК 535.51

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В ОБЛАСТИ ТОЧЕК СЕНГУЛЯРНОСТИ ВАН ХОВА

Н. И. СТАСЬКОВ<sup>1</sup>, А. А. ОМЕЛЬЧЕНКО<sup>3</sup>, С. О. ПАРАШКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

<sup>3</sup>ГЦ «БЕЛМИКРОАНАЛИЗ» ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Беларусь

Состояние поверхности, совершенство кристаллической структуры и оптические характеристики кремниевых пластин – фундаментальные факторы, определяющие качество и надежность интегральных планарных схем. В сравнении с чистым кремнием (сSi) практическое применение находят кремниевые пластины, легированные бором (КДБ12, рсSi). Важнейшими оптическими параметрами пластин являются: ширина запрещенной зоны  $E_g$ ; спектры показателей преломления  $n(E)$ , поглощения  $k(E)$  (экстинкция) и коэффициента поглощения  $\alpha(E)$ , которые рассчитывают в видимой и УФ-спектральной области методом спектральной эллипсометрии. Неоднозначность представленных в литературе результатов можно объяснить несоответствием выбранных дисперсионных функций  $\varepsilon(E) = [n(E) - ik(E)]^2 = \varepsilon_1(E) - i\varepsilon_2(E)$  и электродинамических моделей для исследуемых пластин КДБ. Чаще всего определяются псевдодиэлектрическая функция  $\varepsilon(E)$ , соответствующая простой границе раздела «воздух – объемный КДБ». Особое внимание уделяется измерению спектров углов  $\Delta(E)$  и  $\psi(E)$  в УФ-области, где находят две  $G$ -точки зоны Бриллюэна. Эти точки называют точками сингулярности Ван Хова. Энергия  $E_1$  в первой точке составляет 3,43 эВ [1, 2], а во второй –  $E_2 = 4,25$  эВ [2]. В работе обсуждаются результаты решения обратной задачи спектральной эллипсометрии для подложки КДБ12 с поверхностным слоем Бруггемана, цель которого – установить влияние процесса легирования на оптические характеристики кристаллического кремния.

Спектры ( $1,5 \leq E \leq 6,2$  эВ) углов  $\Delta(E)$  и  $\psi(E)$  пластин измеряли на эллипсометрах UVISEL 2 при углах падения  $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 73^\circ \dots 80^\circ$  ( $\Delta\theta = 1^\circ$ ) и монохроматическом ЛЭФЗМ ( $E = 1,96$  эВ) при углах падения от  $60^\circ$  до  $77^\circ$  ( $\Delta\theta = 1^\circ$ ). На рис. 1 для  $\theta = 70^\circ$  представлены экспериментальные спектры  $\psi_e(E)$  и  $\cos\Delta_e(E)$  пластины КДБ12 и рассчитанные идеальные пластины сSi ( $\psi_i(E), \cos\Delta_i(E)$ ),  $n(E)$  и  $k(E)$ , которые взяты из [3]. Для слоя диоксида кремния  $d = 2,9$  нм спектры  $\cos\Delta_e(E)$  и  $\cos\Delta_i(E)$  практически совпадают. Два максимума в спектрах  $\psi(E)$  приходятся на энергии фотонов 3,43 и 4,25 эВ, соответствующих точкам сингулярности Ван Хова. Ранее установлено, что тонкие

поверхностные слои можно учесть при решении обратных оптических задач без детализации их структуры. При решении обратной задачи эллипсометрии выбрана четырехосцилляторная функция  $\epsilon(E)$  аморфных материалов и учтен поверхностный слой на пластине КДБ12 (ЛЭФЗМ,  $d = 1,8$  нм).

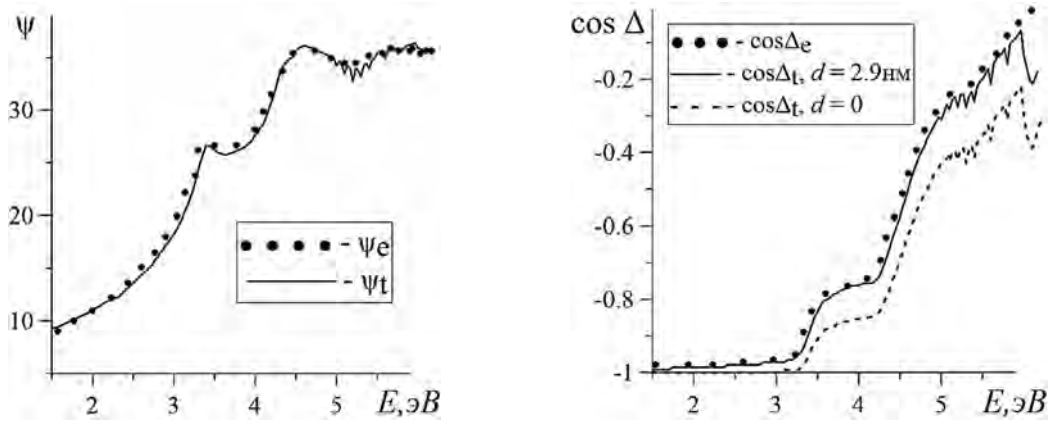


Рис. 1. Спектры эллипсометрических углов кремниевых пластин

На рис. 2 представлены спектры  $\epsilon_2(E)$  и  $\epsilon_1(E)$  чистого кремния и КДБ12. Энергии фотонов, на которые приходятся максимумы спектров  $\epsilon_2(E)$  для КДБ12, равны  $E_1 = 3,46$  эВ,  $E_2 = 3,73$  эВ,  $E_3 = 4,28$  эВ. Причем  $k_1(3,46) = 1,738$ ,  $k_2(3,73) = 1,664$ ,  $k_3(4,28) = 4,195$ . Полосы поглощения  $k_1(E)$  и  $k_3(E)$  вызваны переходами между зонами в точка сингулярности Ван Хова. Их максимумы сдвинуты относительно соответствующих максимумов чистого Si.

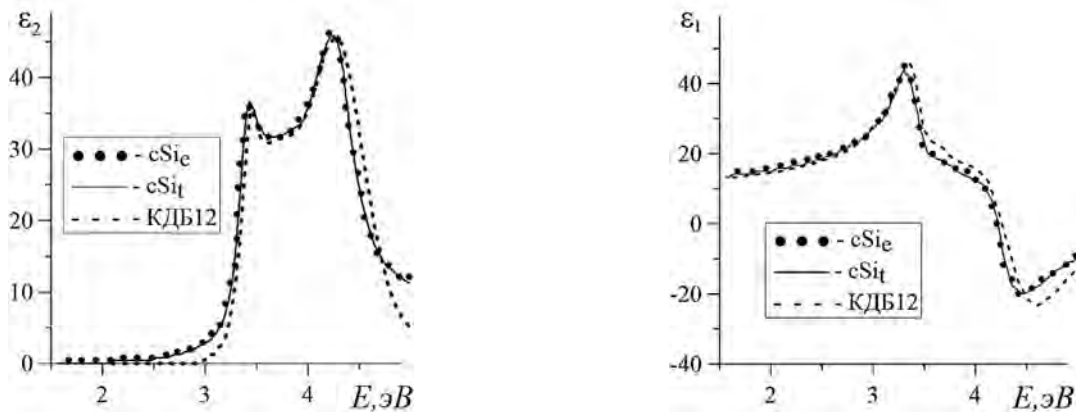


Рис. 2. Диэлектрические проницаемости чистого кремния [3] и КДБ12

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменение оптических параметров кремния после быстрой термической обработки / В. М. Анищик [и др.] // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2021. – № 3. – С. 81–85.
2. **Vica, L.** Effect of heavy doping on the optical properties and the band structure of silicon / L. Vica, M. Cardona // Physical Review B. – Vol. 29, № 12. – P. 6739–6751.
3. **Palik, E. D.** Handbook of Optical Constants of Solids / E. D. Palik. – Academic Press, 1988.

УДК 535.5 + 621.658.011:620.1

## АНАЛИЗ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОМ СТЕКЛЕ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННОГО СВЕТА

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Регистрация и анализ распределения интенсивности рассеянного света на неоднородностях показателя преломления в объеме образца листового стекла, в которой создаются термоупругие напряжения, позволяют определить величину механических напряжений. В работе на основе такого анализа показана возможность получения оценки температурных постоянных стекла, например коэффициента температуропроводности и теплопроводности. В ходе измерений (рис. 1) линейно поляризованный пучок излучения (длина волны 532 нм или 632,8 нм, диаметр 180 мкм) лазера 1 проходит через фокусирующую линзу 2 и поляризатор 3, падает на боковую поверхность стекла 6 и распространяется в нем в направлении оси  $OX$ , при этом плоскость поляризации зондирующего излучения ориентирована относительно оси  $OY$  под углом 45 град. Плоскость поверхности фотоприемника 5, используемого для регистрации рассеянного излучения, ориентирована перпендикулярно оси  $OZ$ , а направление наблюдения рассеянного излучения 4 перпендикулярно ориентации вектора напряженности электрического поля в пучке 8 падающего света.

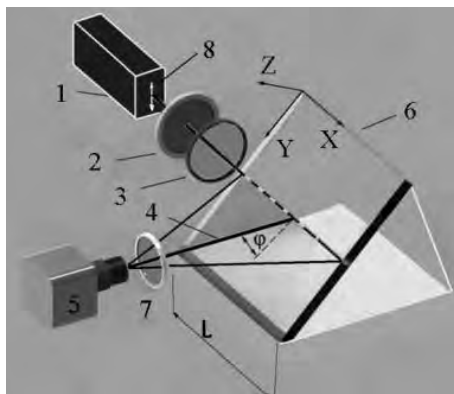


Рис. 1. Схема установки для регистрации распределения интенсивности рассеянного света

Возникающие в анизотропной среде обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные фазовые скорости и их интерференция изменяет состояние поляризации светового пучка при его распространении вдоль образца, что приводит к периодической пространственной модуляции рассеянного света, которая регистрируется в направлении, перпендикулярном направлению распространения зондирующего излучения в анизотропном образце (рис. 2). При этом фазовая задержка возникает на длине, равной периоду регулярного распределения интенсивности рассеянного света. Анализ регистрируемых распределений позволяет получить оценки распределения величины двулу-

чепреломления в таких средах. При исследовании влияния температуры образца на рассеяние света на неоднородностях дисперсных систем показана возможность регистрации изменения периода пространственного распределения рассеянного поляризованного излучения при вариациях температуры.

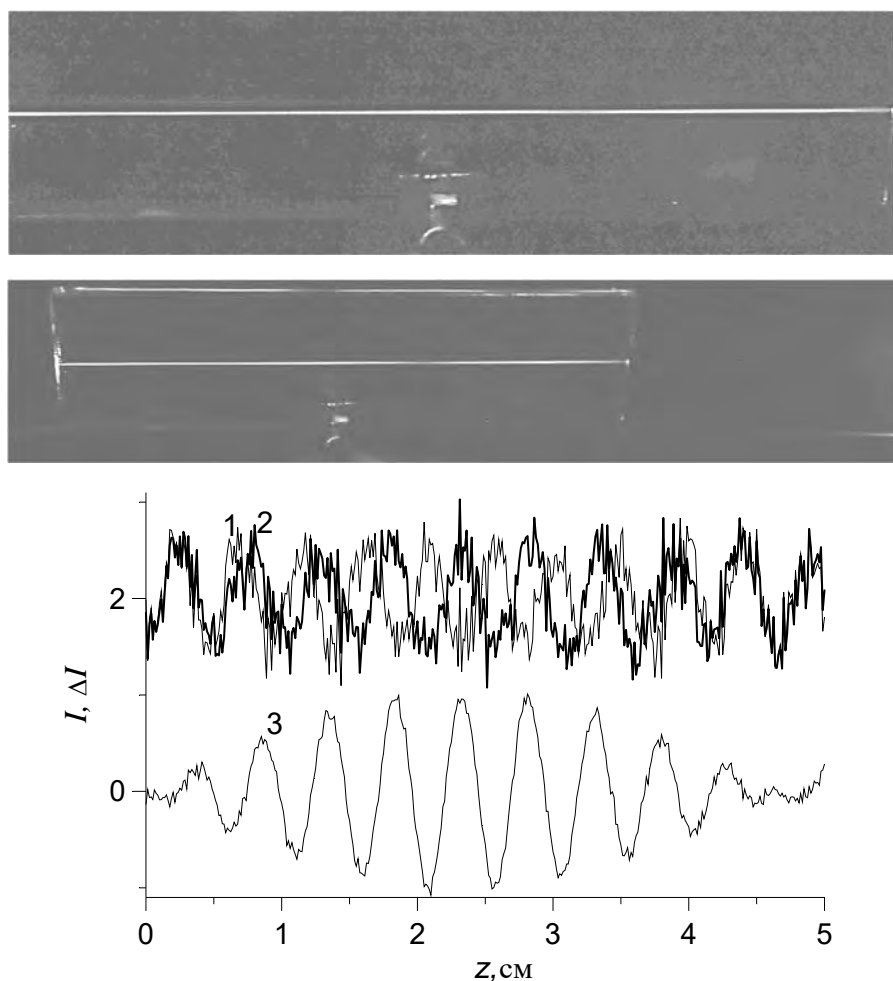


Рис. 2. Изменение пространственного распределения интенсивности рассеянного света при вариациях температуры для пучка, распространяющегося в закаленном стекле (кривые 1 и 2) и их разность  $\Delta I(z)$  (кривая 3): кривая 1 соответствует  $\sigma = 50$  МПа, кривая 2 –  $\sigma = 45$  МПа

На основе исследований влияния температуры на рассеяние света на неоднородностях показателя преломления измерены изменения периода пространственного распределения рассеянного излучения при вариациях температуры. В рамках задачи определения остаточных и термоупругих напряжений в закаленном стекле рассмотрена термоупругая задача, в результате решения которой получены оценки распределения указанных напряжений в различные моменты времени в процессе остывания стекла до температуры окружающей среды. На основе обработки зарегистрированных изменений измерена разность фаз волн взаимной поляризации с учетом погрешности их регистрации, что позволило определить коэффициент температуропроводности с погрешностью менее 10 %.

УДК 535.5 + 621.658.011:620.1

## ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПЛЕНОК ПОЛИМЕРИЗОВАННЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК, Е. В. ПИВОВАРОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Измерение двулучепреломления в анизотропных средах представляет определенный интерес при использовании неоднородных анизотропных материалов в устройствах оптики и оптоэлектроники, примером таких материалов являются пленки полимеризованных жидких кристаллов (ЖК). С этой точки зрения поляризационная интерферометрия [1] может оказаться эффективным методом исследования свойств таких структур. В работе представлены результаты исследования пленок полимеризованных жидких кристаллов. На рис. 1 представлено распределение интенсивности света, прошедшего через слой ЖК.

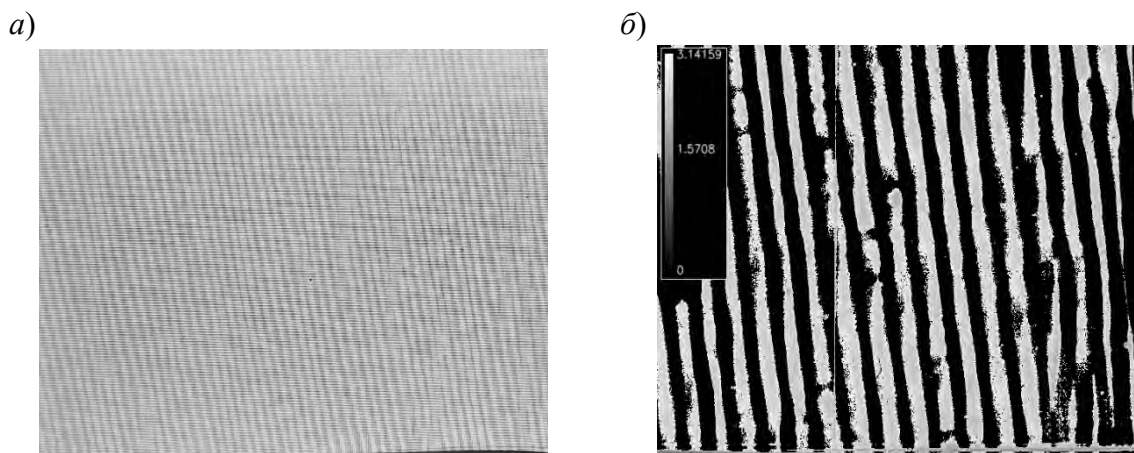


Рис. 1. Изображение ЖК-пленки (а) и распределение разности фаз для поляризованного света, прошедшего через нее (б)

Анализ таких распределений позволяет определить двулучепреломление в исследуемых образцах и его распределение по плоскости. Исследованы возможности метода определения двулучепреломления в анизотропном слое, основанного на регистрации и обработке пространственного распределения интенсивности света. Величина двулучепреломления измерена также независимым методом, получена удовлетворительная корреляция результатов с данными независимых методов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомченко, А. В. Поляризационная интерферометрия неоднородных анизотропных сред / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2017. – № 6. – С. 152–157.



УДК 535.42

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НИТЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИЕЙ

П. Я. ЧУДАКОВСКИЙ, Н. С. МАНКЕВИЧ, И. А. КОРНЕЕВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В работе анализируются возможности оптической дифрактометрии для исследования металлических нитей (волокон, проволок и т. д.), поверхность которых характеризуется наличием дефектов, шероховатостей, текстуры, сторонних включений. Необходимость изучения таких объектов состоит в том, что металлические нити используются, например, в качестве армирующих элементов промышленных изделий [1]. Так, в процессе армирования нить, находясь в состоянии механического напряжения, контактирует с некоторой средой, имеющей изначально жидкую фазу, переходящую с течением времени в твердую фазу. Состояние поверхности металлической нити влияет на смачивание нити жидкостью и, как следствие, на результат «сцепления» затвердевшей среды с нитью.

Неоднородности поверхности нити в данном исследовании представлены искусственно выполненной шероховатостью со случайным распределением параметров и коррозионным образованием. На рис. 1 и 2 приведены результаты дифрактометрического исследования металлической нити диаметром 0,64 мм с использованием лазерного излучения с длиной волны 0,6328 мкм.

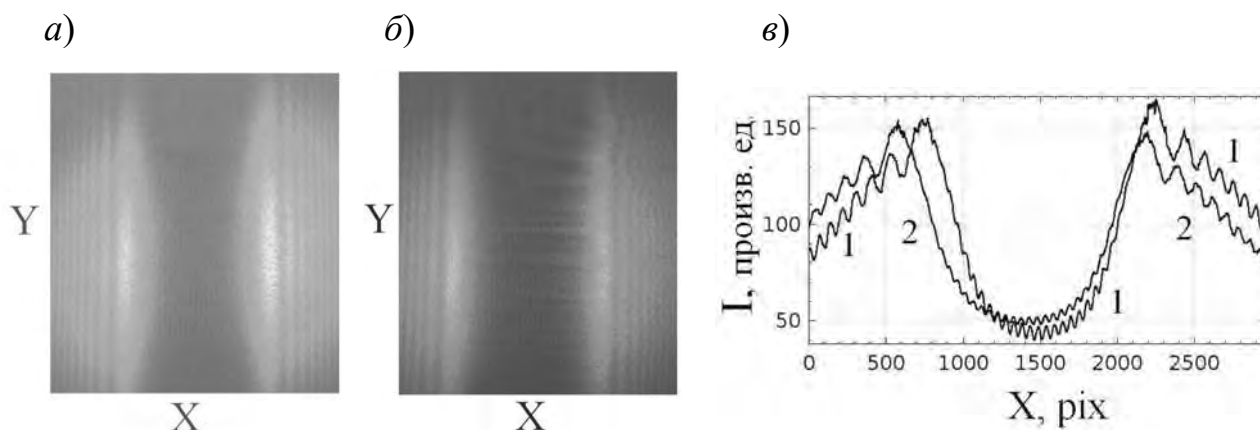


Рис. 1. Дифракционные картины и усредненные распределения интенсивностей: а – дифракционная картина от нити с гладкой поверхностью; б – дифракционная картина от нити с шероховатой поверхностью; в – усредненные распределения интенсивностей: 1 – для нити с гладкой поверхностью; 2 – для нити с шероховатой поверхностью

Как видно из рис. 1, б, в случае шероховатой нити в дифракционной картине в области глобального минимума интенсивности проявляются *горизонтальные* светлые и темные полосы (вторичные максимумы и минимумы интенсивности). На рис. 1, в наблюдается расхождение и в усредненных распределениях

интенсивностей света. В случае дифракции света на нити с коррозией поверхности (рис. 2, а, в) в области глобального минимума интенсивности дифракционной картины также наблюдаются вторичные максимумы и минимумы интенсивности (*вертикальные светлые и темные полосы*).

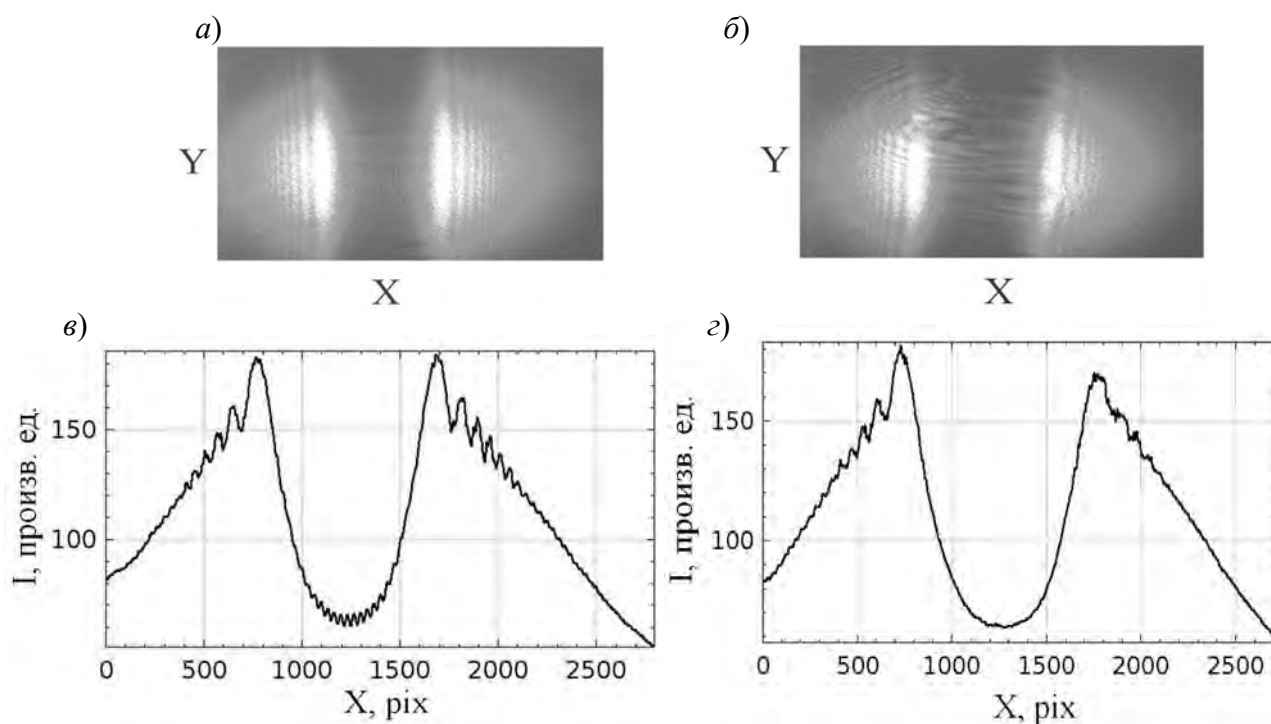


Рис. 2. Дифрактометрическое исследование нити с коррозией поверхности: а – дифракционная картина от нити с коррозией поверхности; б – дифракционная картина от нити с коррозией поверхности, покрытой сажей; в – усредненное распределение интенсивности для дифракционной картины (а); з – усредненное распределение интенсивности для дифракционной картины (б)

Чтобы проверить чувствительность метода дифрактометрии к малым изменениям состояния поверхности, на нить с коррозией поверхности осаждалась сажа. Результаты представлены на рис. 2, б, з. Из рисунков видно, что дифракционная картина существенно изменилась (см. рис. 2, б), а в усредненном распределении интенсивности (см. рис. 2, з) в области глобального минимума отсутствуют дифракционные колебания. Исчезновение дифракционных колебаний можно объяснить заполнением сажей коррозионных образований и изменением отражательной способности поверхности нити.

Таким образом, представленные результаты показывают чувствительность оптической дифрактометрии к различным изменениям поверхности исследуемых объектов, что может быть использовано при дистанционной экспресс-диагностике объектов в режиме реального времени.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of the roughness of steel fibre surface on its wettability and the cement paste close to fibre surface / A. Antonova [et al.] // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 289. – P. 123–139.

УДК 620.179.14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ  
НИКЕЛЕВЫХ СЛОЕВ И ПОКРЫТИЙ

В. И. ШАРАНДО, А. В. ЧЕРНЫШЕВ, И. Е. ЗАГОРСКИЙ

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

В [1] показано, что толщинометрия деформированного и отожжённого электролитического никеля может вестись с помощью накладного вихретокового преобразователя по измерениям амплитуды вносимой ЭДС и ее третьей гармонической составляющей. Приборы, основанные на этих методах, могут быть применены для промышленного контроля никелевых покрытий на немагнитных основаниях, позволяя получать основную и корректирующую информацию, связанную с состоянием никеля после его нанесения и термообработки. В то же время следует учитывать, что в заводских условиях поверхность изделий покрывают слоями гальванического никеля, имеющего свои структурные особенности и отличный от электролитического никеля химсостав. В результате этого могут значительно изменяться измеряемые приборами сигналы.

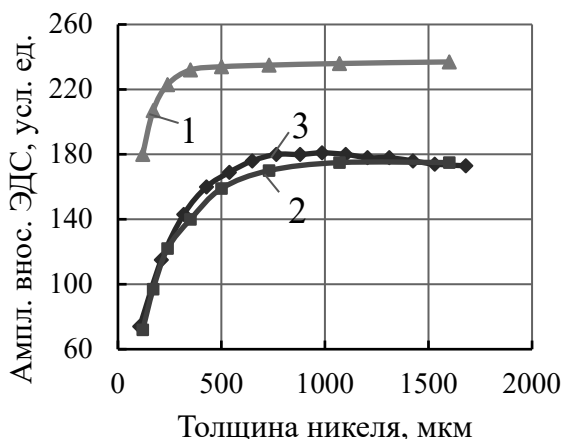
Целью работы являлось получение сравнительной информации со слоёв электролитического никеля высокой степени чистоты и промышленного гальванического никеля для оценки структурного состояния никелевых покрытий и создания методик их электромагнитного контроля.

Определялись амплитуды вносимой ЭДС [2] и её третьей гармонической составляющей (последняя измерялась с помощью прибора ПКТ-2 [3]) в выходном сигнале накладного вихретокового преобразователя. В обоих случаях исследования велись с помощью одного и того же преобразователя, состоящего из трех соосных катушек – поля возбуждения и расположенных у её торцов, включенных между собой, дифференциально измерительной и компенсационной. Наружный диаметр катушек составлял 10 мм. По катушке поля возбуждения пропускался синусоидальный ток частотой 2,5 кГц.

Отожжённые в течение 3 ч на воздухе при 700 °С пластинки различной толщины из электролитического никеля чистотой 99,77 % прокатали на 33 %, затем отрезанные от них части снова отожгли при 700 °С в течение 1 ч. В итоге были созданы две серии образцов с заданным набором толщин и наличием либо отсутствием деформации. Был также нанесён на проводящее основание с минимальной адгезией слой никеля толщиной 110 мкм по технологиям, применяемым на ракетных предприятиях. Полученная и отделенная от основания пластина разрезана на куски, из которых создавались стопки задаваемой толщины. Размер каждого образца составлял 32 × 22 мм.

Зависимость амплитуд вносимой ЭДС и ее третьей гармонической составляющей (сигнал ПКТ-2) накладного вихретокового преобразователя от толщины отожжённого и деформированного электролитического никеля, а также стопок гальванического никеля, представлена на рис. 1.

а)



б)

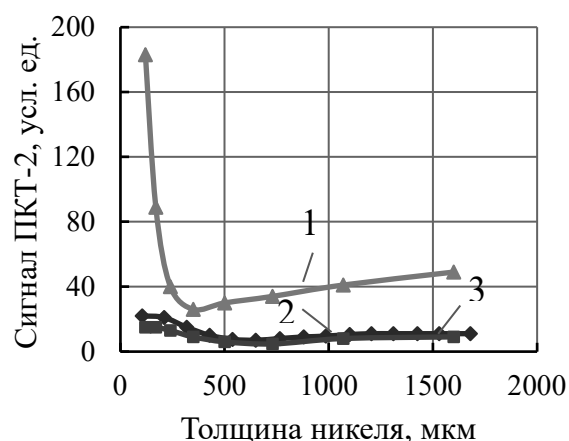


Рис. 1. Зависимость амплитуд вносимой ЭДС (а) и ее третьей гармонической составляющей (б) накладного вихретокового преобразователя от толщины отожжённого (1) и деформированного (2) электролитического никеля, стопок (3) гальванического никеля

Амплитуда вносимой ЭДС накладного вихретокового преобразователя возрастает с толщиной как отожжённых, так и деформированных образцов. При этом контроль первых возможен до толщин порядка 400...500 мкм, вторых — до 1000 мкм. Показания прибора ПКТ-2 на деформированном никеле имеют невысокие значения и слабо зависят от толщины. На отожжённых образцах измеряемый сигнал изменяется неоднозначно по диапазону толщин. Возможно совместное применение обеих методик контроля с учётом используемых диапазонов толщин никеля.

Кривые как амплитуд вносимой ЭДС, так и ее третьей гармонической составляющей для образцов гальванического никеля совпадают с кривыми, полученными для образцов прокатанного на 33 % электролитического никеля. Из этого результата следует, что наносимый на промышленные изделия в качестве покрытий гальванический никель имеет такой же уровень структурных напряжений, как и деформированный на 33 % электролитический никель. На это необходимо обращать внимание при разработке методик электромагнитного контроля процессов никелирования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарандо, В. И. Магнитодинамическая и электромагнитная толщинометрия деформированных и отожжённых никелевых покрытий / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 26–31.
2. Дорофеев, А. Л. Индукционная структуроскопия / А. Л. Дорофеев. – Москва: Энергия, 1973. – 176 с.
3. Гусак, Н. О. Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н. О. Гусак, А. В. Чернышев, В. Л. Цукерман // Дефектоскопия. – 1991. – № 10. – С. 92.

УДК 620.179.14

МАГНИТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ  
НИКЕЛЕВЫХ СЛОЕВ И ПОКРЫТИЙ

В. И. ШАРАНДО, А. В. ЧЕРНЫШЕВ, А. А. ПОЛОНЕВИЧ

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

В настоящее время во многих отраслях промышленности и, в частности, при производстве ракетной техники применяются гальванические никелевые покрытия на немагнитных основаниях. В [1] проведены исследования деформированного и отожжённого электролитического никеля с помощью магнитодинамического метода неразрушающего контроля. При этом показано, что связанную с толщиной и структурным состоянием его слоёв информацию можно получать по измерению величины магнитного потока, создаваемого при контакте изделия с магнитным толщиномером, и последующему определению величины намагниченности, оставляемой этим толщиномером на его поверхности. Однако при промышленной толщинометрии никелевых покрытий на немагнитных основаниях могут возникать вопросы, связанные с влиянием на результат измерений их структуры и конкретного химического состава.

Целью работы являлось получение сравнительной информации со слоёв электролитического никеля высокой степени чистоты и промышленного гальванического никеля для оценки структурного состояния никелевых покрытий и создания магнитодинамических методик их контроля.

При выполнении работы измерялся сигнал магнитодинамического толщиномера МТЦ-3-2 [2]. Прибор регистрирует изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей сопряжённый со стержневым магнитом железный наконечник, при его соприкосновении и последующем удалении от ферромагнитного изделия. В первичном преобразователе использован магнит из NdFeB с энергией 45 мДж. Измеряемый сигнал зависит от количества ферромагнитного материала в рабочей зоне преобразователя и характеризует изменение толщины никелевого слоя. Измерителем остаточной намагниченности ИОН-4 [2], использующим устанавливаемую на изделие катушку без магнита, определялся поток индукции от магнитного пятна, оставленного преобразователем толщиномера МТЦ-3-2 после его удаления с поверхности никеля.

Отожжённые в течение 3 ч на воздухе при 700 °С пластинки различной толщины из электролитического никеля чистотой 99,77 % прокатали на 33 %, затем отрезанные от них части снова отожгли при 700 °С в течение 1 ч. В итоге были созданы две серии образцов с заданным набором толщин и наличием либо отсутствием деформации. Был также нанесён на проводящее основание с минимальной адгезией слой никеля толщиной 110 мкм по технологиям, применяемым на ракетных предприятиях. Полученная и отделенная от основания пластина разрезана на куски, из которых создавались стопки задаваемой толщины. Размер каждого образца составлял 32 × 22 мм.

Зависимость показаний приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 (в условных единицах), от толщины отожжённого и деформированного электролитического никеля, а также стопок гальванического никеля, представлена на рис. 1.

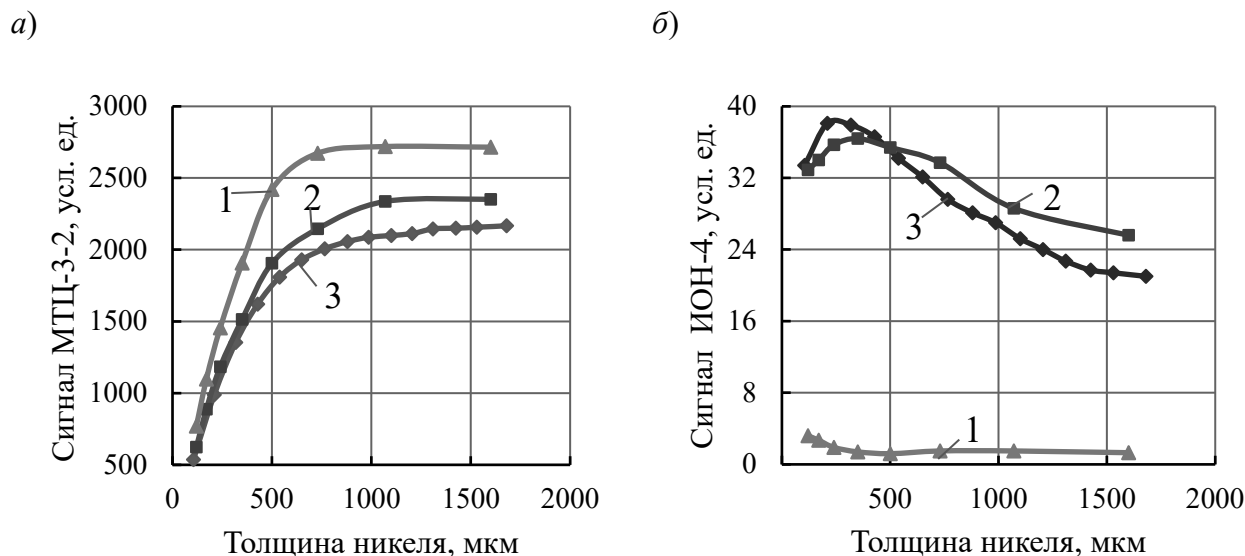


Рис. 1. Зависимость показаний приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от толщины отожжённого (1) и деформированного (2) электролитического никеля, стопок (3) гальванического никеля

Прибор МТЦ-3-2 показывает различающиеся, но однозначные зависимости от толщины как для отожжённых, так и деформированных образцов электролитического никеля. Измеряемая прибором ИОН-4 остаточная намагниченность близка к нулевой для всех толщин отожжённого никеля. Для деформированного никеля показания неоднозначны, однако изменения сигнала в используемом на производстве диапазоне 200...700 мкм невелики. Это позволяет при толщинометрии использовать данные МТЦ-3-2 в качестве основных, а ИОН-4 – корректирующих по учёту структуры.

Кривые для гальванического никеля в случае обоих приборов близки к кривым для деформированного электролитического никеля. Некоторое несовпадение связано с примесями и отличающимися структурными дефектами в гальваническом никеле. В целом же гальванический и деформированный на 33 % электролитический никель имеют сравнимые внутренние напряжения. Это необходимо учитывать при создании градуировок для средств контроля.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарандо, В. И. Магнитодинамическая и электромагнитная толщинометрия деформированных и отожжённых никелевых покрытий / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова // *Не разрушающий контроль и диагностика*. – 2021. – № 4. – С. 26–31.

2. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ АН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/lab1/products/>. – Дата доступа: 05.01.2024.

УДК 681.787

## ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛАСТИН

А. В. ШУЛЬГА, И. В. ШИЛОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Интерферометрические методы измерения оптических параметров прозрачных объектов нашли широкое применение в оптической промышленности [1]. Наблюдаемая в таких методах интерференция света в зеркальных пластинках, между которыми расположен интересующий исследователя фазовый объект, несёт информацию о его оптических свойствах. Как правило, в качестве источника монохроматического света используются газоразрядные лампы. В случае лазерной интерферометрии, используется трёхзеркальная схема, в которой исследуемый объект помещают в пассивное плечо резонатора лазера.

В работе продемонстрирована возможность внутрирезонаторного сканирования интерферограммы оптического объекта (плоскопараллельной пластины), помещённого в резонатор гелий-неонового лазера.

Схема экспериментальной установки (рис. 1) представляет собой резонатор гелий-неонового лазера, в который помещена кварцевая плоскопараллельная пластина под углом, близким к перпендикулярному к внутрирезонаторному излучению. Угловое положение пластины контролируется при помощи двух моторизованных платформ, обеспечивающих вращение пластины вокруг двух осей: горизонтальной (перпендикулярной внутрирезонаторному излучению) и вертикальной. Для этого на горизонтально расположенную поворотную платформу (Y-платформа) крепилась вертикально другая такая же поворотная платформа (X-платформа), на которой, в свою очередь, крепился исследуемый образец. Шаг углового сканирования по обеим осям составлял 0,02 град. Таким образом обеспечивалось двумерное вращение исследуемых пластин. Фотоприёмником 5, установленным за выходным зеркалом резонатора, регистрировалась интенсивность внутрирезонаторного излучения. Внутрирезонаторная интерферограмма кварцевых пластин разной толщины показана на рис. 2.

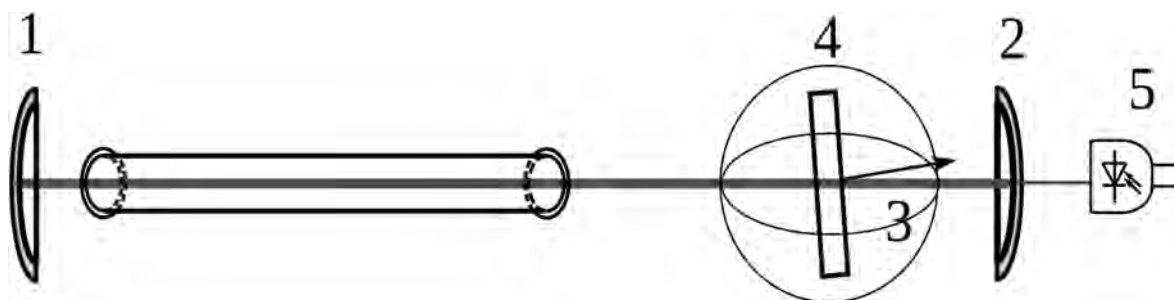


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2 – глухие зеркала лазера; 3 – поворотная платформа двумерного вращения; 4 – прозрачный плоскопараллельный образец; 5 – фотоприёмник

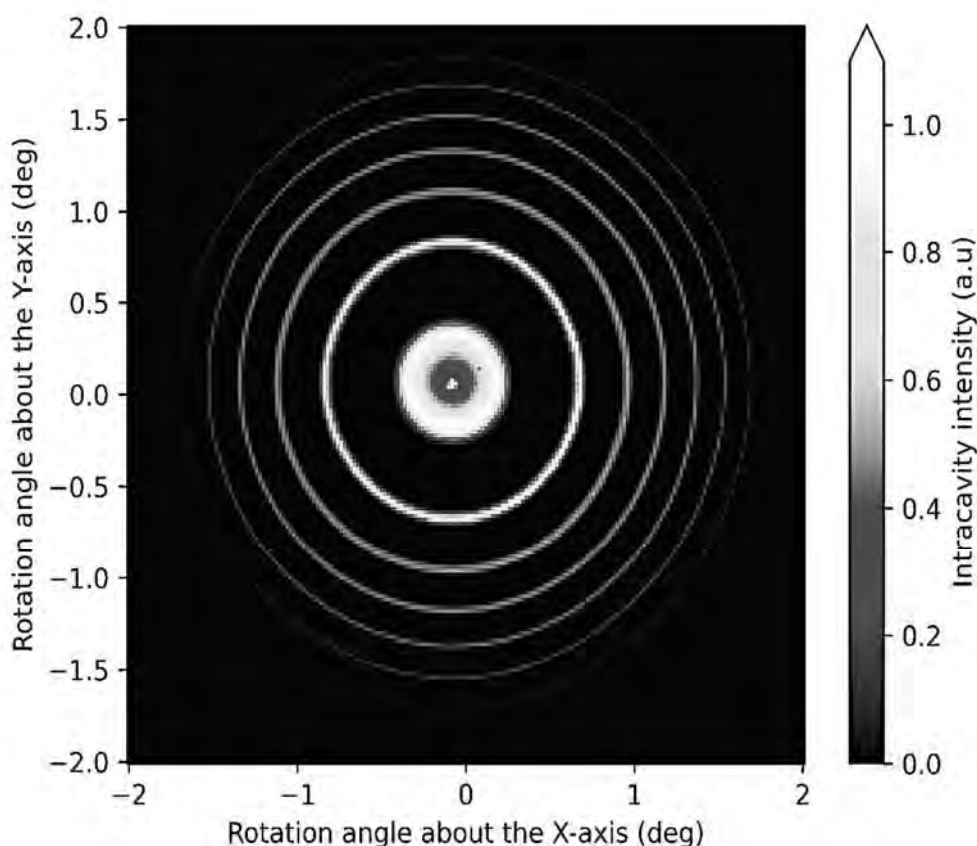


Рис. 2. Внутриврезонаторная интерферограмма кварцевой пластины толщиной 6,0 мм

Как видно из рис. 2, внутриврезонаторные интерферограммы отличаются заметно высоким контрастом по сравнению с обычными, т. к. генерация излучения происходила только в случае определённых угловых положений пластинки, при которых наблюдалось интерференционное «просветление», когда световые лучи, отражённые от обеих поверхностей пластины, совпадают по фазе. Следует отметить, что применение внутриврезонаторного метода возможно только в случае оптических пластин с высокой плоскопараллельностью и высоким коэффициентом пропускания материала, из которых они изготовлены. Это делает возможным применение метода для контроля качества оптических пластин с низким коэффициентом отражения.

Предложенный подход можно рассматривать как развитие методов многолучевой интерферометрии, где информация о фазовом объекте представлена в виде промоделированного по амплитуде внутриврезонаторного излучения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скоков, И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике / И. В. Скоков. – Москва: Машиностроение, 1989. – 256 с.: ил.



УДК 621.3: 621.791

## РАЗРАБОТКА ОСНОВНОГО БЛОКА МОБИЛЬНОГО РЕГИСТРАТОРА СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

С. В. БОЛОТОВ, Н. А. ТОЛПЫГО, А. В. КУШНЕР

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Основной блок мобильного регистратора сварочных процессов МРСР-БРУ-01 (рис. 1) служит для получения информации о сварочном токе и напряжении, отправки полученных данных на мобильное устройство через связь Wi-Fi.



Рис. 1. Внешний вид основного блока мобильного регистратора

Главным элементом основного блока (рис. 2) является контроллер ESP32, программирование которого выполняется дистанционно. Цифровыми выходами DO контроллер управляет индикацией режима работы, индикацией соединения с Wi-Fi, индикацией заряда аккумулятора, блокировкой сварочного аппарата. На аналоговые входы AI контроллера приходят сигналы от датчика тока и датчика напряжения через разъем для подключения блока датчиков, напряжение заряда аккумулятора через делитель напряжения с 4,2 до 3,3 В. UART-порт контроллера используется для взаимодействия с USB-модулем, который предназначен для записи получаемых данных на флэш-память в случае обрыва соединения с сервером. Контроллер оперирует напряжением 3,3 В.

Основной блок питается от аккумулятора, номинальное напряжение которого 3,7 В, а напряжение полного заряда 4,2 В. Аккумулятор заряжается через контроллер заряда. Напряжение питания аккумулятора поступает на два повышающих преобразователя. Первый повышающий преобразователь питает контроллер напряжением 5 В, второй – конвертер напряжением 12 В. Конвертер имеет двухполярное выходное напряжение  $\pm 15$  В, которое поступает на разъем для питания блока датчиков.

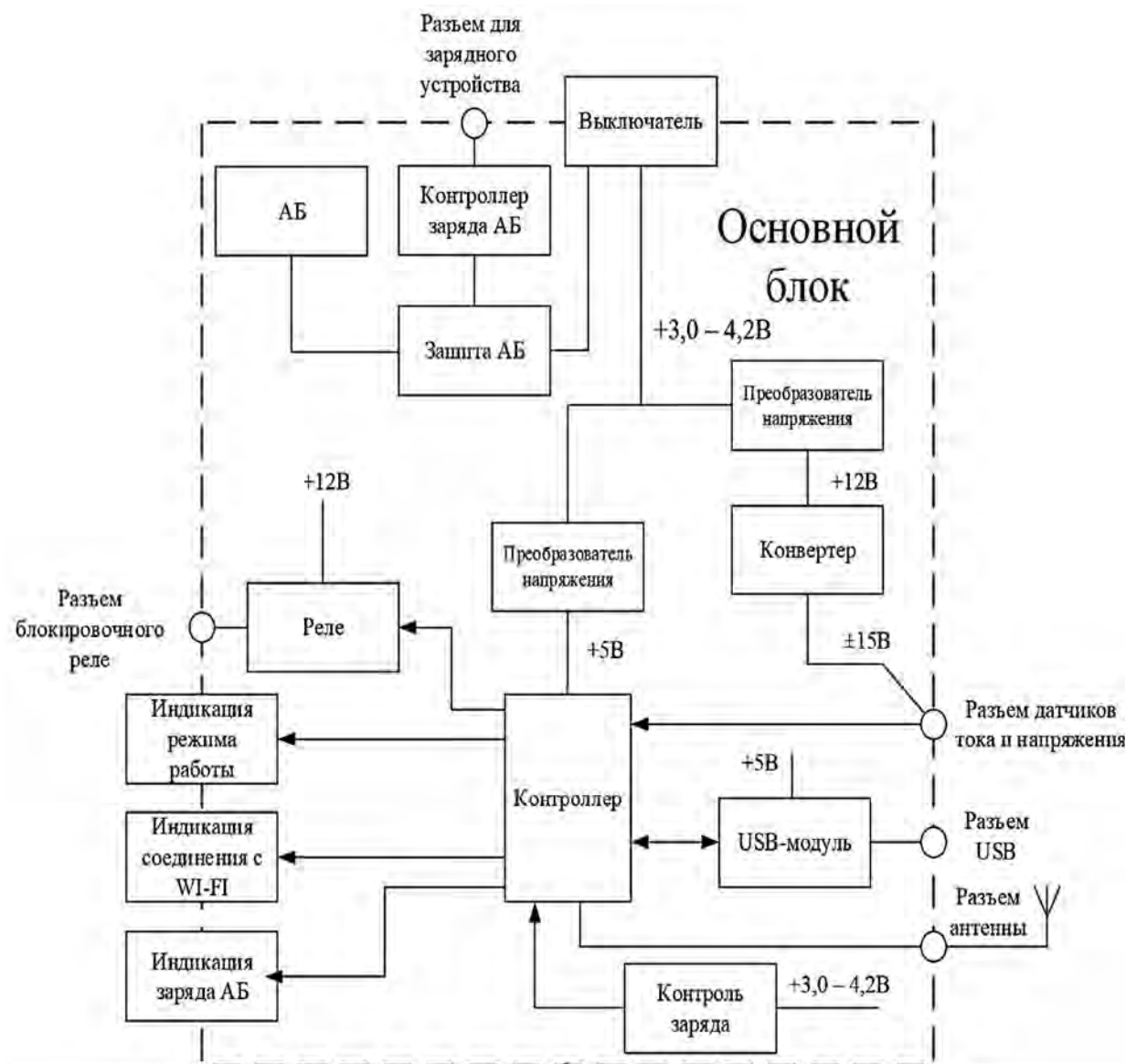


Рис. 2. Структурная схема основного блока мобильного регистратора

Схема электрическая принципиальная основного блока состоит из следующих узлов: платы основного блока (A1); USB-модуля (A2); узла индикации (VD1–VD3). USB-модуль CH376S (A2) припаивается к плате основного блока и взаимодействует с контроллером по интерфейсу UART. Узел индикации состоит из светодиодов (VD1–VD3) и информирует о режиме работы (VD1), соединении с Wi-Fi (VD2), заряде аккумулятора (VD3).

Плата основного блока (A1) является ведущим устройством в блоке, осуществляющим управление всеми основными узлами. К контактным площадкам платы припаиваются: разъем для зарядки аккумулятора (XS2); разъем блокировки (XP1); разъем для подключения блока датчиков (XP2); выключатель клавишный (SA1) для подачи питания на основной блок.

Проектирование печатной платы выполнено в среде Altium Designer. Корпус основного блока спроектирован в КОМПАС-3D. Выполнена его печать из пластика ABS на 3D-принтере Ulti steel.

УДК 62-83

## К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСТАНОВОК

Л. В. ЖЕСТКОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Одним из приоритетных направлений модернизации электрооборудования промышленных механизмов является энергосбережение. В Республике Беларусь принята Программа комплексной модернизации производств энергетической сферы на 2021–2025 годы, целью которой является реализация мероприятий по комплексной модернизации электрических станций и котельных, электрических и тепловых сетей организаций, входящих в состав ГПО «Белэнерго».

Центробежные насосы в системах отопления и холодного и горячего водоснабжения потребляют до четверти вырабатываемой электроэнергии. Мощность насосов может достигать величины до десятков мегаватт. Работа этих установок характеризуется неравномерным потреблением воды в течение суток.

Регулирование подачи  $Q$  традиционно осуществляется изменением сечения магистрали. Электропривод насоса в этом случае – нерегулируемый. На задвижке создается перепад напора, и теряется мощность  $\Delta P_z$ , которая составляет до 38,5 % от мощности на валу двигателя. Таким образом, дросселирование весьма неэкономично. Этот метод регулирования подачи применяется на установках мощностью в несколько киловатт, в небольшом диапазоне регулирования.

Системы с нерегулируемым электроприводом не обеспечивают требуемого снижения потребляемой мощности при уменьшении расхода воды, что приводит к росту давления в трубопроводе, утечкам воды и износу оборудования.

Применение регулирования подачи  $Q$  изменением скорости приводного двигателя насоса позволяет решить отмеченные проблемы. Характерный пример – станции водоснабжения и системы отопления. Мощности двигателей выбираются исходя из максимальной производительности, а большую часть времени они работают с меньшей производительностью из-за изменения потребления воды в разные периоды времени. Среднесуточная загрузка, например, насосов подачи холодной воды – до 55 % от максимальной.

Исследования показывают, что затраты на электроэнергию занимают около 30 % в себестоимости перекачки 1 м<sup>3</sup> воды. Так как рост затрат на электроэнергию опережает рост других затрат, проблемы энергосбережения при работе насосов подачи холодной и горячей воды имеют важное значение.

Результаты расчета потребляемой мощности двигателей насоса  $P_1$  для двух методов регулирования при заданном значении подачи  $Q$  и различных значениях статического напора  $H_{ст}$  представлены на рис. 1 в относительных единицах.

Из графика следует, что, задавая подачу  $Q$ , можно определить потребляемую мощность  $P_1$  привода при дроссельном и частотном регулировании, а также экономию потребляемой мощности. Со снижением статического напора  $H_{ст}$

увеличивается экономия электроэнергии при внедрении частотно-регулируемого электропривода. Кроме того, обеспечивается поддержание напора  $H$  в системе независимо от расхода.

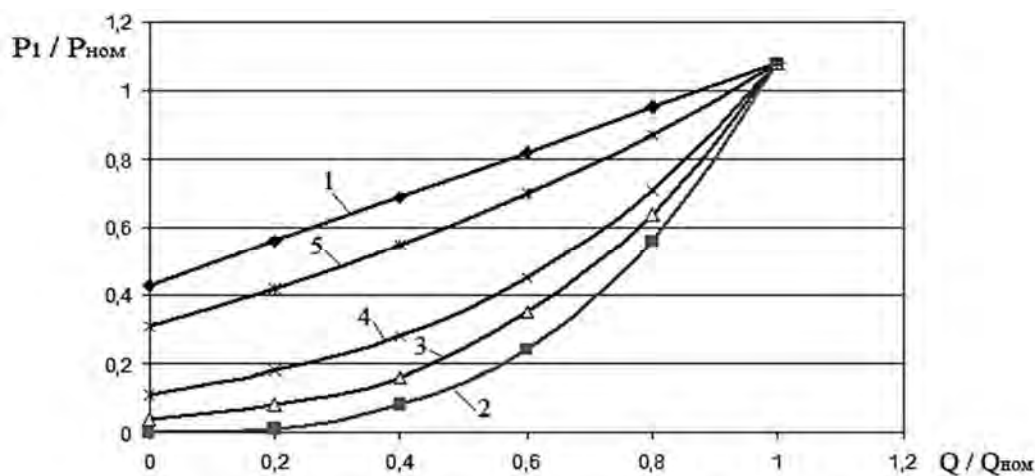


Рис. 1. Зависимость потребляемой мощности насоса от производительности: 1 – дроссельное регулирование; 2 – частотное регулирование при  $H_{см} = 0$ ; 3 – частотное регулирование при  $H_{см} = 0,2$ ; 4 – частотное регулирование при  $H_{см} = 0,4$ ; 5 – частотное регулирование при  $H_{см} = 0,8$

Работы по модернизации электрооборудования котельной Бельничского У КП «Жилкомхоз» подтверждают проведенные расчеты. Применение частотно-регулируемых приводов насосов позволило снизить годовые затраты энергии с 840 480 до 751 764 кВт·ч. Экономия составила 88 716 кВт·ч или 10,5 %. По данным текущего режима работы насосного оборудования на рис. 2 построен примерный график мощности, потребляемой насосами в течение года.

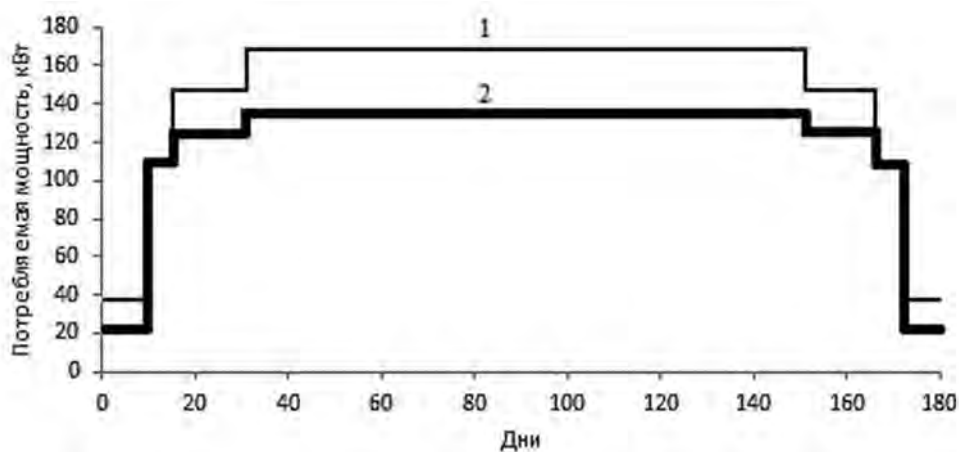


Рис. 2. График мощности, потребляемой насосным оборудованием: 1 – до модернизации; 2 – после модернизации

Таким образом, частотно-регулируемый электропривод насосных установок является эффективным способом энергосбережения.

УДК 62-83:621

РАСЧЕТ ЦИКЛОВОГО КПД БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ПАССАЖИРСКИХ ЛИФТОВ

А. С. КОВАЛЬ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В настоящее время в практику жилищного строительства внедряются пассажирские лифты с безредукторным регулируемым электроприводом переменного тока. Они востребованы, т. к. наряду с возможностью формирования управляемых переходных режимов при пуске и торможении кабины лифта не требуют машинного помещения для размещения силового электрооборудования. Особенность такого электропривода – отсутствие редуктора, а в электромеханической системе электропривода – применение высокомоментных тихоходных двигателей асинхронных короткозамкнутых либо синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе.

В доступных литературных источниках для таких двигателей отсутствуют некоторые необходимые технические данные. Например, с учетом цикличности работы лифтов, значения циклового КПД для оценки энергопотребления. Аналитическая оценка этого показателя, с учетом задаваемой тахограммы (s-образная тахограмма формирования скорости кабины лифта при синусоидальном изменении рывка при пуске и торможении) разгона и торможения кабины лифта, актуальна.

Для тахограммы формирования скорости кабины лифта при синусоидальном изменении рывка при пуске и торможении с использованием предлагаемой в [1] методики расчета основных управляемых электромагнитных потерь при пуске и торможении в рассматриваемых типах тихоходных двигателей при векторном управлении и с учетом оценки механической работы на валу двигателя в переходных режимах и движении кабины с установившейся скоростью представлены выражения для расчета циклового КПД.

Приведены расчетные графики энергии, потребляемой на валу двигателя (подводимой к валу двигателя) и преобразуемой в механическую работу (отдаваемой в сеть), а также примеры расчета циклового КПД для цикла перемещения пустой кабины вверх-вниз на три этажа.

Показано, что оценка циклового КПД асинхронного высокомоментного асинхронного двигателя или синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе в рассматриваемом цикле значительно меньше его значений в установившемся режиме работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль, А. С. К вопросу определения циклового КПД асинхронного двигателя частотно регулируемого привода лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2. – С. 41–48.

УДК 004.02:621:628.9

## ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМОСТИ ФЛИКЕРА

В. М. КОВАЛЬЧУК

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Известно, что в электрических сетях колебания напряжения (КН) вызывают фликер (мерцание) светового потока электрических источников света, который ухудшает функциональные показатели работающих в условиях электрического освещения.

Например, в середине 70-х гг. прошлого века Г. Н. Яговкиным (кафедра охраны труда МЭИ) были выполнены исследования, которые ставили своей целью изучение влияния периодических мерцаний с частотой  $f$  3–20 раз в секунду (т. е. герц) на скорость зрительного восприятия (СЗВ). Исследования проводились на экспериментальной установке, созданной на базе фотометрической скамьи и адаптационной полусферы конструкции проф. А. А. Труханова. Воспроизведение КН в цепях питания ламп адаптационной полусферы и осветительного тест-объекта осуществлялось путем шунтирования тиристорным ключом резисторов, служащих для настройки величины питания напряжения. Это позволило получить прямоугольную форму КН симметричной формы, т. е. длительность падения напряжения подбиралась равной половине периода.

Эксперименты выполнялись для нескольких условий освещенности:

- при постоянстве напряжения в сети;
- при колебаниях напряжения 3 раза в секунду величиной  $\delta U$  0,4 %, 0,7 %, 1,0 %, 1,3 %, 1,6 % от номинала;
- при колебаниях напряжения 10 раз в секунду величиной  $\delta U$  0,3 %, 0,5 %, 0,7 %, 0,9 % от номинала;
- при колебаниях напряжения 20 раз в секунду величиной  $\delta U$  0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 % от номинала.

Эти пределы выбирались после предварительных опытов с двумя наблюдателями таким образом, чтобы четко отражался характер изменения СЗВ. Зрительная работа была точной и напряженной, поскольку объектом различения служило кольцо Ландольта, разрыв которого был виден наблюдателю под углом 2 с. После получасовой адаптации наблюдатели вычеркивали из специальных тестов кольца Ландольта с заданным направлением разрыва. Вычеркивание производилось в течение 20 мин. В опытах принимали участие шесть наблюдателей. В результате исследований была определена зависимость

СЗВ от величины  $\delta U$  и частоты  $f$  прямоугольных КН в сети (табл. 1). За 100 % принято значение скорости зрительного восприятия при постоянстве напряжения в сети. Каждое значение соответствует среднему значению от 40–50 наблюдений.

Табл. 1. Зависимость СЗВ от величины  $\delta U$  и частоты  $f$  КН в сети

Частота КН $f$ , Гц	Размах КН $\delta U$ , %	СЗВ, %
3	0,4	100
3	0,7	100
3	1,0	99
3	1,3	94
3	1,6	92
10	0,3	100
10	0,5	97
10	0,7	90
20	0,5	100
20	1,0	100
20	1,5	99
20	2,0	92

Аппроксимация данных показывает, что снижение СЗВ у работающих в условиях электрического освещения от ламп накаливания в среднем не более чем на 5 % вызовут КН с частотой 10 Гц с размахом не менее  $\delta U = 0,6$  %, с частотой 3 Гц с размахом не менее 1,4 %, а с частотой 20 Гц с размахом не менее 1,7 %.

Согласно же требованиям действующего стандарта [1], допустимый размах КН в электрических сетях прямоугольной формы с частотой 10 Гц равен 0,34 %, с частотой 3 Гц – 0,717 %, а с частотой 20 Гц – 0,97 %. Такое существенное различие к допустимому уровню фликера еще раз подчеркивает [2] необходимость пересмотра существующего стандарта [1].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 51317.4.15–2012. Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 38 с.
2. Ковальчук, В. М. Оценка электромагнитной совместимости по дозе фликера / В. М. Ковальчук // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2 (71). – С. 50–56.

УДК 621.32

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Одним из наиболее простых и эффективных способов энергосбережения в системах снабжения электрической энергией (ССЭЭ) промышленных и сельскохозяйственных предприятий, т. е. повышения коэффициента мощности электрических нагрузок (ЭН) приемников электрической энергии (ПЭЭ) в электрических сетях переменного тока (ЭСПТ) частотой 50 или 60 Гц с номинальным напряжением 0,4 кВ, является использование для компенсации реактивной мощности (РМ) ЭН ПЭЭ автоматизированных конденсаторных установок (АКУ).

Предлагается рассмотреть различные аспекты проектирования универсальных и специализированных ССЭЭ промышленных и сельскохозяйственных предприятий на основе АКУ мощностью от 50 до 400 кВАр в ЭСПТ частотой 50 Гц с номинальным напряжением 0,4 кВ ОАО «Минский электротехнический завод имени В. И. Козлова» Республики Беларусь (далее – АКУ-МЭТЗ).

Большинство ПЭЭ в отраслях промышленности наряду с активной мощностью (АМ) потребляют и РМ (смешанная нагрузка). Наличие смешанной нагрузки требует при реализации ССЭЭ электрооборудование большей мощности (силовые трансформаторы, силовые кабели, выключатели вакуумные и другое электрооборудование), а также вызывает следующие нежелательные последствия: увеличение потребляемых АМ и РМ; увеличение падения напряжения и потерь на нагрев в шинах и кабелях в ЭСПТ; сокращение срока службы электрооборудования; увеличение на 30 %...60 % расходов на оплату за потребляемую электрическую энергию из ЭСПТ.

Использование АКУ-МЭТЗ-0,4 кВ в ССЭЭ позволяет решить ряд следующих вопросов:

- уменьшить установленную мощность силовых трансформаторов (при снижении потребления АМ и РМ);
- обеспечить подключение ПЭЭ в ЭСПТ шинами и кабелями с меньшим сечением токоведущих элементов;
- подключить в ССЭЭ дополнительно ПЭЭ.

АКУ-МЭТЗ оснащена регулятором РМ, который обеспечивает автоматическое регулирование РМ.

Микропроцессорные регуляторы РМ обеспечивают интеллектуальный контроль параметров ЭСПТ напряжением 0,4 кВ, производят точный (дискретный) автоматический подбор РМ АКУ, необходимой для компенсации РМ ПЭЭ в режиме реального времени.

В докладе будут представлены результаты исследований для различных вариантов построения ССЭЭ для магистральных, радиальных и комбинированных схем в ЭСПТ.



УДК 621.313.333

## КОНТРОЛЬ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Д. В. МИРОШ

Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь

Рассмотрен контроль межвитковых замыканий (далее – МКЗ) в асинхронных электродвигателях (далее – АЭД). Оценка состояния АЭД является важной задачей, что связано с их большим распространением в промышленности, на транспорте и в других сферах жизнедеятельности людей. По некоторым данным, представленным в [1], около половины от всей потребляемой энергии приходится именно на АЭД, доля которых составляет около 80 % от всех электрических двигателей.

Известно, что МКЗ является основной причиной неисправности АЭД. При МКЗ изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя электрической машины [2, 3], а в худшем случае – к нештатным аварийным ситуациям.

Согласно данным в [3, 4], более чем три неисправности из четырех приходится на МКЗ, что свидетельствует о необходимости разработки и применения современных методов по диагностике. Также в [5] были приведены ряд обоснований, анализ причин неисправностей электродвигателей, используемых на железнодорожном подвижном транспорте, а также некоторая корректировка общего хода исследования, связанная с высокой долей выхода из строя АЭД по причине неисправности подшипников.

Для исследования МКЗ можно выбрать несколько путей реализации: постановка опытов на натуральных образцах АЭД; моделирование процессов при помощи схемы замещения; моделирование в сторонних программных комплексах (Multisim, Ansys и др.). Разработка модели в программном обеспечении Ansys позволяет с достаточно высокой проработкой оценить не только электромеханические процессы, происходящие в электродвигателе, но и тепловые. Смоделированный образец можно прорабатывать как для оценки его характеристик и сравнения их с натурными образцами, так и для совершенствования конструкции, что и было сделано в ходе исследования.

Однако любая модель (в том числе и схема замещения), независимо от сложности, является виртуальным образцом, что накладывает некоторые ограничения. Данных ограничений можно избежать лишь опытным путем на реальных образцах. Вдобавок, такой подход позволяет получить большое число данных по натурным испытаниям, что послужит ценной информацией для современных технологий обработки. Предлагается использование сверточных

нейронных сетей, что позволяет обрабатывать данные в графическом виде. Разработанная сверточная нейронная сеть реализована в библиотеке TensorFlow для языка Python 3.10.

На данном этапе отработано проведение МКЗ на двигателях малой мощности в диапазоне 0,12...1,5 кВт для трех вариантов подключения АЭД: по схеме «треугольник»; «звезда с изолированной нейтралью»; «звезда с нулевым проводом». Для примера на рис. 1 приведены исследования токов в трех фазах, протекающих в момент МКЗ по каждой из обмоток статора АЭД.

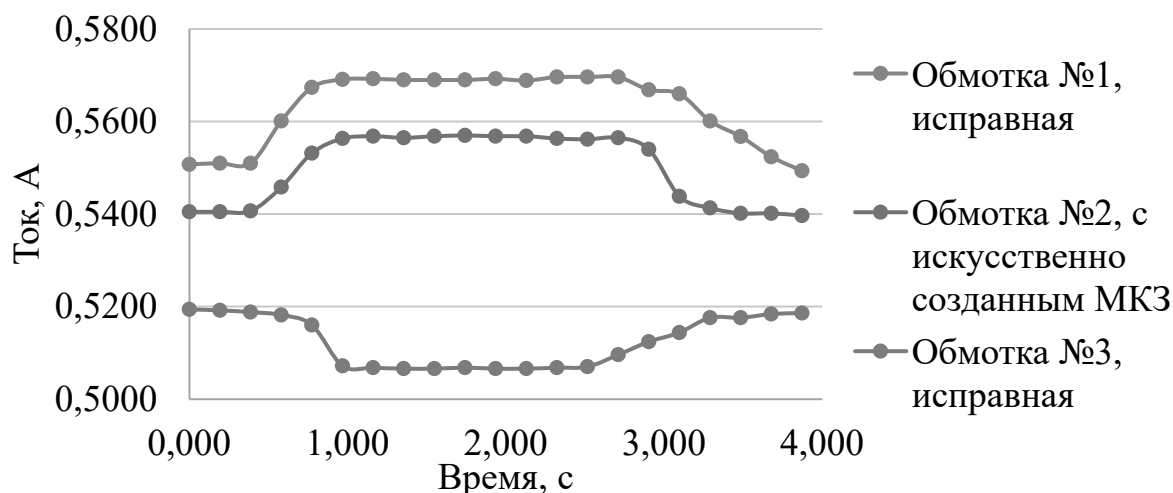


Рис. 1. Распределение токов в обмотках статора в момент протекания МКЗ

Данный график построен по средним значениям большой выборки данных для схемы «звезда с изолированной нейтралью». В ходе опытов на других АЭД изначальная небольшая разность, заметная на графике в левой части по токам в фазах, является нормой. Использование значений тока может послужить одним из факторов классификации МКЗ для сверточной нейронной сети.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галушко, В. Н.** Электрические машины: учебно-методическое пособие / В. Н. Галушко, В. А. Пацкевич. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 242 с.
2. **Саргсян, С. В.** Оценка состояния изоляции обмотки двигателя при воздействии влаги / С. В. Саргсян // Вестн. НПУА. – 2019. – № 2. – С. 52–59.
3. **Воробьев, В. Е.** Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – Санкт-Петербург: СЗТУ, 2004. – 56 с.
4. **Bonnett, A. H.** Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors / A. H. Bonnett, G. C. Sonknp // IEEE Trans. Industry Applications. – 1992. – Vol. 28, № 4. – P. 921–937.
5. **Мирош, Д. В.** Анализ неисправностей асинхронных двигателей железнодорожной отрасли и их диагностика на базе искусственного интеллекта / Д. В. Мирош, В. Н. Галушко, И. Л. Громько // Энергоэффективность. – 2023. – № 4 (306). – С. 30–32.

УДК 621.3:658.34

## ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Л. Г. ЧЕРНАЯ<sup>1</sup>, В. Н. АБАБУРКО<sup>1</sup>, А. Е. САЗОНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Департамент по надзору за безопасным ведением работ  
в промышленности (Госпромнадзор)

Минск, Беларусь

Промышленное взрывозащищенное электрооборудование, а также его системы управления проектируются в соответствии с требованиями технического регламента ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах». Указанный технический регламент нормирует допустимые требования к взрывобезопасности и электробезопасности. Однако для повышения общего уровня безопасности при эксплуатации оборудования в промышленных условиях их не всегда достаточно. Это связано с тем, что стремление минимизации как временных, так и материальных затрат при изготовлении и монтаже электрооборудования приводит к упрощению схемотехнических решений и использованию более дешевых комплектующих, характеристики которых удовлетворяют требованиям ТР ТС 012/2011 в течение оговоренного срока эксплуатации. Однако не всегда имеется возможность у промышленных предприятий обновить или модернизировать существующие системы управления взрывозащищенным электрооборудованием.

В этом случае возникают иные опасности, не учитываемые требованиями ТР ТС 012/2011 и иными нормативными документами в сфере электробезопасности: получение механических и термических травм вследствие нештатной работы технологического оборудования; поломки технологического оборудования; выпуск бракованной продукции из-за несоответствия показателей качества заданной программе производства.

Для повышения безопасности и снижения риска возникновения негативных факторов предлагаются следующие мероприятия:

1) дублировать датчики контроля нештатных режимов оборудования не только в системах противоаварийной защиты, но и в остальных системах управления оборудованием;

2) дублировать критически важные с точки зрения предотвращения аварийного или аномального режима исполнительные элементы (например, обеспечивать разрыв главной электрической цепи питания не одним, а двумя последовательно включенными контакторами, которые гарантировано обесточат электрические цепи даже в случае отказа одного из них);

3) использовать специализированные реле безопасности, отслеживающие сигналы как с датчиков техпроцесса, так и контролирующие состояние отдельных исполнительных компонентов (замыкание контакторов и магнитных пускателей, промежуточных реле, положение элементов ограждения рабочей

зоны и т. п.); для микропроцессорных модульных систем управления следует использовать специализированные модули безопасности для входных и выходных цепей;

4) правильно оценивать требуемый уровень полноты безопасности системы и использовать оборудование, имеющее соответствующую маркировку уровня функциональной безопасности, подтвержденную соответствующим сертификатом.

Комплекс стандартов СТБ ИЕС 61508-1–2014 «Функциональная безопасность электрических, электронных, программируемых электронных систем, относящихся к безопасности» позволяет дать оценку безопасности системы и обеспечить меры по достижению требуемого уровня полноты безопасности, который зависит от вероятности отказов.

Вероятность отказа исходной системы без резервирования определяем по формуле

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где  $P_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента системы.

Вероятность отказа системы с общим резервированием всех элементов находим по формуле

$$Q_c(t) = Q_{OC}(t) \cdot Q_{PC}(t),$$

где  $Q_{OC}(t)$  – вероятность отказа основной системы;  $Q_{PC}(t)$  – вероятность отказа резервной системы.

Вероятность отказа системы с поэлементным резервированием определяем по формуле

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t),$$

где  $P_i$  – вероятность безотказной работы системы с поэлементным резервированием.

$$P_c(t) = P_{11-21}(t) \cdot P_{12-22}(t) \cdot P_{13-23}(t),$$

где  $P_{11-21}(t)$  – вероятность безотказной работы группы из первого основного и резервного элементов;  $P_{12-22}(t)$  – вероятность безотказной работы группы из второго основного и резервного элементов;  $P_{13-23}(t)$  – вероятность безотказной работы группы из третьего основного и резервного элементов.

Самая низкая вероятность отказов – в системе с поэлементным резервированием, но которая требует не только дополнительных материальных затрат, но и особой методики монтажа.

Указанные мероприятия позволят повысить уровень безопасности и продлить эксплуатацию систем промышленного взрывозащищенного электрооборудования.

УДК 621.3:658.34

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ УЗЛОВ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА

Л. Г. ЧЕРНАЯ<sup>1</sup>, А. Е. САЗОНКО<sup>2</sup>, Е. М. КАЗАК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Департамент по надзору за безопасным ведением работ  
в промышленности (Госпромнадзор)  
Минск, Беларусь

При поставке узлов взрывозащищенного оборудования потребителю возникает необходимость подтверждения их соответствия требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах».

Особенность сертификации узлов взрывозащищенного оборудования заключается в том, что узлы оборудования состоят из отдельных элементов, которые входят в состав узлов и имеют собственные сертификаты соответствия, но при сборке и монтаже такого оборудования необходимо обеспечить взрывобезопасность всего узла, которая зависит от методов монтажа, изменения температуры в узле при эксплуатации с учетом сборки отдельных элементов и их взаимодействия. С этой целью решением Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 31 августа 2020 г. № 132 П) был принят межгосударственный стандарт ГОСТ 31610.46–2020 (IEC TS 60079-46:2017) *Взрывоопасные среды. Часть 46. Узлы оборудования* (Explosive atmospheres. Part 46. Equipment assemblies) и внесен в перечень стандартов к ТР ТС 012/2011 решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 22.11.2022 г. № 182.

Орган по сертификации сможет оценить взрывобезопасность узла при исследовании необходимых сопроводительных документов, предоставляемых изготовителем оборудования:

- 1) перечень отдельных элементов, входящих в узел, с указанием их маркировки взрывозащиты и индивидуальных сертификатов соответствия, а также других элементов, которые могут иметь отношение к взрывозащите узла оборудования ;
- 2) сборочные чертежи размещения элементов в узле оборудования со спецификацией;
- 3) схемы электрические принципиальные с перечнем элементов;
- 4) схемы электрические соединений с таблицей соединений;
- 5) для искробезопасных систем – документ, подтверждающий условия искробезопасности системы;

б) инструкции для узла оборудования и каждого отдельного элемента;

7) документ о соответствии узла оборудования классификации взрывоопасной зоны, группе (подгруппе) и температурному классу взрывоопасной смеси, условиям монтажа.

В маркировку взрывозащиты узла оборудования входят уровень взрывозащиты, группа (подгруппа), температурный класс, но не указывается вид взрывозащиты, он заменяется на номер стандарта IEC (МЭК) «60079-46», который является основополагающим для межгосударственного стандарта ГОСТ 31610.46–2020 (IEC TS 60079-46:2017).

Температурный класс для узла оборудования выбирается из условия самой высокой максимальной температуры поверхности любого отдельного элемента оборудования (например, температурный класс отдельного элемента узла оборудования Т4 соответствует максимальной температуре поверхности 135 °С, а температурный класс отдельного элемента узла оборудования Т6 – максимальной температуре поверхности 85 °С). В этом случае для узла оборудования в маркировке взрывозащиты указывается температурный класс – Т4 с максимальной температурой поверхности 135 °С.

Выбор подгруппы для узла оборудования основывается на самой низкой (например, IIВ ниже, чем IIС) маркировке подгруппы отдельных элементов оборудования, входящих в узел.

Выбор маркировки уровня взрывозащиты узла оборудования основывается на самой низкой (например, Gc ниже, чем Gb, и ниже, чем Ga) маркировке уровня взрывозащиты отдельных элементов оборудования, входящих в узел.

В состав узла оборудования могут входить отдельные элементы разных изготовителей, но в качестве наименования изготовителя в маркировке узла оборудования указывают наименование изготовителя узла оборудования.

В сертификате на узел оборудования взрывозащищенный должны быть указаны, кроме стандартов по видам взрывозащиты, стандарты по монтажу взрывозащищенного оборудования и стандарт на узлы оборудования, а также специальное условие применения, предписывающее, что монтаж необходимо осуществлять в соответствии с инструкциями. Тогда в маркировке взрывозащиты узла оборудования в конце размещается знак «Х».

Белорусско-Российский университет, как специализированная организация Госпромнадзора МЧС Республики Беларусь согласно договору о сотрудничестве, проводит разъяснения ведущим предприятиям Республики Беларусь, занятым изготовлением и эксплуатацией узлов оборудования, по обеспечению взрывобезопасности.

УДК 636.084.1

## ВОПРОСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ЖИДКИХ КОРМОВЫХ СМЕСЕЙ

Д. В. ШНИП  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Важнейшим критерием для выращивания здорового молодняка на молочно-товарных фермах является своевременное и качественное питание. Предлагаются к рассмотрению вопросы энергосбережения для технологических процессов нагревания, пастеризации и охлаждения жидких кормовых смесей.

Процесс приготовления жидких кормовых смесей представляет собой процесс нагревания, пастеризации и охлаждения, осуществляемый в стационарных (мобильных) моделях пастеризаторов либо молочных такси с функцией пастеризации.

Процесс пастеризации можно разделить на следующие основные этапы:

- 1) этап 1 – нагрев жидких кормовых смесей до заданной температуры пастеризации;
- 2) этап 2 – поддержание заданной температуры жидких кормовых смесей на этапе пастеризации;
- 3) этап 3 – охлаждение жидких кормовых смесей до заданной температуры кормления.

Повышение показателя энергоэффективности пастеризатора (молочного такси) достигается на этапах 1 и 2 следующим путём:

- 1) этап 1 – сокращение времени нагрева жидких кормовых смесей;
- 2) этап 3 – сокращение времени охлаждения жидких кормовых смесей.

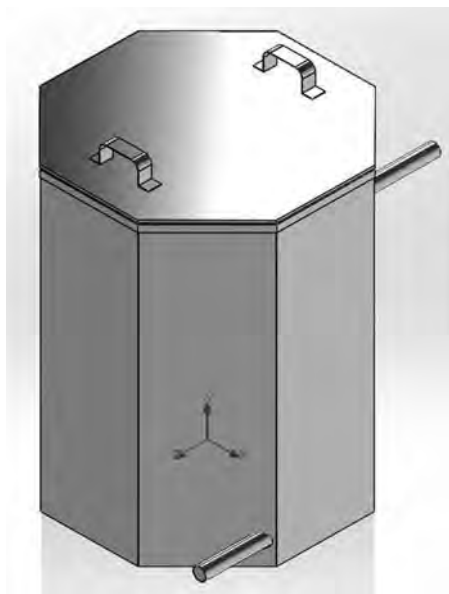
Это, в свою очередь, способствует снижению количества затраченной электроэнергии на один цикл пастеризации, снижению расхода воды на один цикл пастеризации, что способствует повышению общего показателя эффективности молочно-товарной фермы.

Компьютерное моделирование в SOLIDWORKS Flow Simulation позволяет осуществить симуляцию различных вариантов протекания технологических процессов нагревания, пастеризации и охлаждения жидких кормовых смесей в пастеризаторе (молочном такси), что дает возможность на раннем этапе разработки выявить конструкционные недостатки, пока цена ошибки не столь высока.

3D-модель ёмкости для нагревания, пастеризации и охлаждения пастеризатора (молочного такси) представлена на рис. 1. На рис. 2 приведены результаты моделирования в SOLIDWORKS Flow Simulation технологических процессов нагревания, пастеризации и охлаждения жидких кормовых смесей.

В докладе будут рассмотрены более детально результаты моделирования технологических процессов нагревания, пастеризации и охлаждения на разработанных 3D-моделях в SOLIDWORKS Flow Simulation.

а)



б)

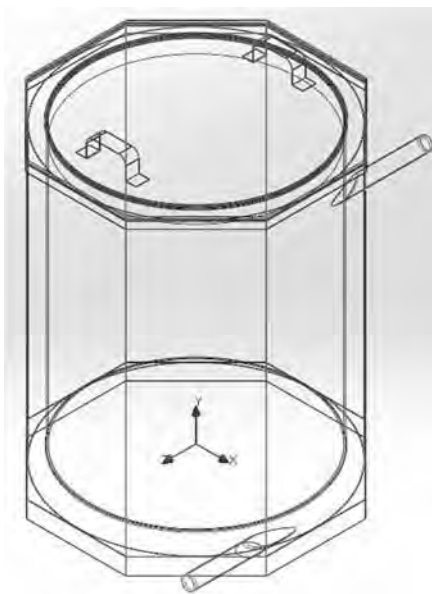
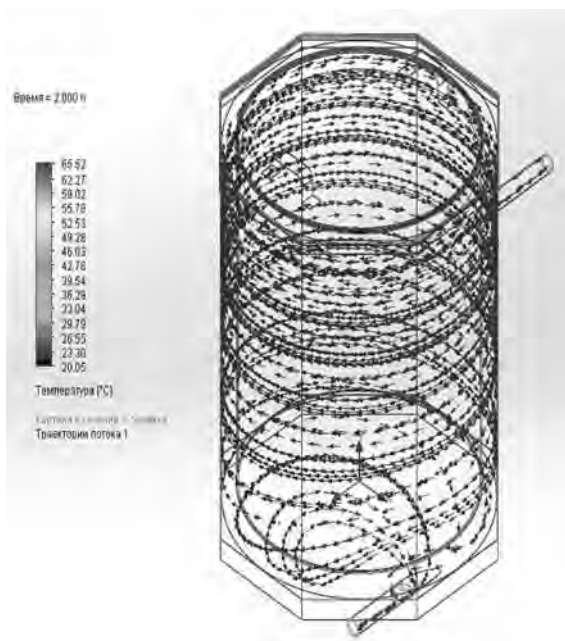


Рис. 1. 3D-модель ёмкости для пастеризации: *а* – отображение 3D-модели ёмкости для пастеризации с включённой функцией «закрасить с кромками» в SOLIDWORKS; *б* – отображение 3D-модели ёмкости для пастеризации с включённой функцией «каркасное представление» в SOLIDWORKS

а)



б)

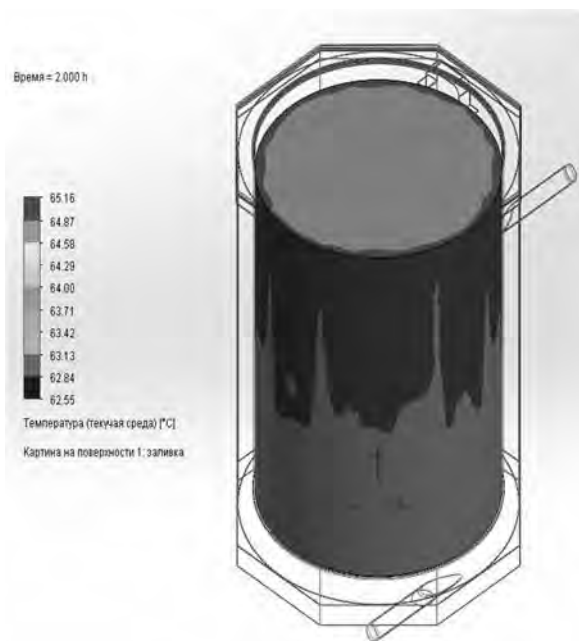


Рис. 2. Результаты моделирования в SOLIDWORKS Flow Simulation процесса пастеризации жидких кормовых смесей: *а* – направление теплового потока в нагревательной полости; *б* – распределение температуры жидкой кормовой смеси в процессе приготовления



УДК 636.084.1

## 3D-МОДЕЛЬ МОЛОЧНОГО ТАКСИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Д. В. ШНИП

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Продовольственная безопасность – одна из важнейших задач любого государства. Предлагается к рассмотрению 3D-модель молочного такси КОМПАС-3D/SOLIDWORKS для рассмотрения работы электропривода.

Молочное такси представляет из себя платформу, предназначенную для транспортировки жидких кормовых смесей, оснащённую электроприводом, что обуславливает следующие требования:

1) к времени доставки жидких кормовых смесей;  
2) к надёжности (сохранению объёма жидких кормовых смесей) доставки жидких кормовых смесей при движении с оптимальными траекториями ( $t_{дост} \rightarrow \min$ );

3) к алгоритмам движения при необходимости движения по «пересечённой местности» (дорогах с плохим качеством дорожного покрытия согласно ТКП 140–2015, трещины, выбоины, просадки, проломы дорожной одежды и др.), во время доставки жидких кормовых смесей от места приготовления к месту кормления животных.

Компьютерное моделирование работы электропривода молочного такси на раннем этапе разработки позволяет выявить конструкционные недостатки, пока цена ошибки не столь велика. 3D-модель молочного такси КОМПАС-3D/SOLIDWORKS представлена на рис. 1.

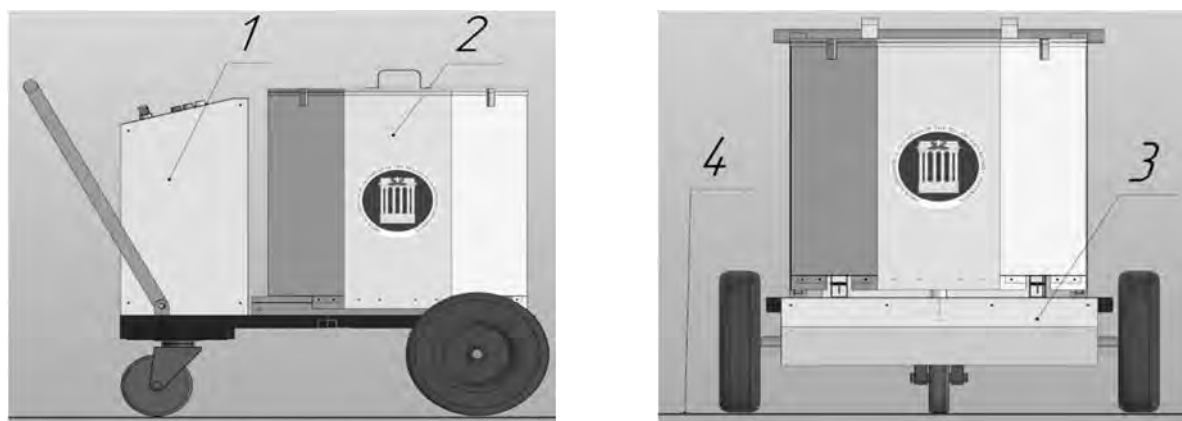


Рис. 1. 3D-модель молочного такси КОМПАС-3D/SOLIDWORKS: 1 – блок управления молочным такси; 2 – ёмкость молочного такси для транспортировки жидкой кормовой смеси; 3 – моторный отсек молочного такси; 4 – поверхность

В докладе будут рассмотрены результаты моделирования электропривода для различных алгоритмов движения.

УДК 004.8

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ  
ДЛЯ ВЫСТРАИВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ  
РЕАБИЛИТАЦИИ

Д. Г. АРСЕНЬЕВ<sup>1</sup>, А. Е. МИСНИК<sup>2</sup>, М. А. ШАЛУХОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Специализированные программные средства необходимы для создания и развития бизнес-процессов в сложных кибер-физических системах, в том числе системах функциональной диагностики состояния опорно-двигательного аппарата человека. При разработке программных модулей требуется учитывать специфику отрасли применения конечного продукта – в динамично развивающихся сферах требуется сочетать возможности современного программного обеспечения с потенциалом использования существующих программных модулей. Программные комплексы, работающие в сфере реабилитации послеоперационных больных, требуют постоянного совершенствования: подходы к хирургическим вмешательствам и методики реабилитации динамично меняются. Онтологическое представление позволяет представить конфигурацию информационной системы через онтологическую модель, которая может быть расширена и дополнена, обеспечивая лаконичную структуру, доступную для понимания компонентов системы и их взаимосвязей [1, 2].

Высокотехнологичную медицинскую помощь по специальности травматология и ортопедия оказывает Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования» Министерства здравоохранения Российской Федерации (г. Смоленск). В Центре проводятся операции по протезированию опорных элементов искусственными аналогами, в том числе эндопротезирование суставов, что позволяет безболезненно двигаться и полноценно жить. Условием закрепления успешного результата операции является квалифицированный постоперационный уход и восстанавливающее лечение, грамотно налаженный реабилитационный процесс помогает вернуться к нормальному образу жизни. Каждый пациент имеет индивидуальные особенности, влияющие на прохождение процесса реабилитации, в связи с чем возникает необходимость разрабатывать индивидуальный план восстановительных мероприятий для каждого больного. Дальнейший процесс восстановления может также проходить с особенностями,

что требует от специалиста-реабилитолога постоянной корректировки плана реабилитации пациента.

Использование технологий искусственного интеллекта, компьютерного зрения и дополненной реальности для анализа и мониторинга функционального состояния опорно-двигательного аппарата человека является перспективным направлением для автоматизации и стандартизации процессов сбора и анализа информации о состоянии костей, суставов и мышц. Системы, сочетающие онтологический подход и инструменты компьютерного зрения, могут быстро обрабатывать большие объемы информации и выдавать подробные заключения, снижая нагрузку на врачей по анализу и интерпретации данных, позволяют составить и актуализировать рекомендации по коррекции опорно-двигательного аппарата на основе полученных данных пациента [3].

Для решения поставленной задачи была создана система для функциональной диагностики и адаптивной коррекции опорно-двигательного аппарата человека, основанная на компьютерном зрении. Работа системы проходит в несколько этапов: используя компьютерное зрение, программный модуль фиксирует изменения положения конечности с помощью опорных точек. Затем траекторный анализ опорных точек указывает на изменения углов движения, которые соответствуют траектории движения конечностей пациента во время выполнения заданного упражнения. Для получения текущих данных о пациенте программный модуль измеряет угол сгибания в соответствии с действующей методикой функциональной реабилитации. Данные о полученном угле передаются в модуль хранения тестов, обновляя данные о текущей модели пациента и его статусе. Статус пациента предназначен для привлечения внимания лечащего врача в случае, если значения измерений пациента выходят за пределы нормальных значений, с учетом дня реабилитации. На основе обновлённых данных пациента составляется новый план его индивидуальной реабилитации в соответствии с траекторией восстановления.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Misnik, A. E.** Ontological Engineering on Metagraphs Basis / A. E. Misnik // VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – Moscow, 2022. – P. 1–6.
2. **Bobryakov, A.** Management of Industrial and Technological Processes of Complex Systems Based on Modified Neuro-Fuzzy Petri Nets / A. Bobryakov, A. Misnik, S. Prakupenka // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 2965. – P. 276–283.
3. **Misnik, A. E.** Application of Computer Vision Technologies to Reduce Injuries in the Athletes' Training / A. E. Misnik, A. A. Velkov, M. A. Shalukhova // Intelligent Information Technologies for Industry: Proceedings of the Seventh International Scientific Conference. – 2023. – Vol. 777. – P. 137–145.

УДК 004.942

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ РАБОТЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-СБОРОЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. В. БОБРЯКОВ<sup>1</sup>, С. А. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

За последние 5 лет в условиях жесткой конкуренции на рынке, нестабильности поставок компонентов, связанных с экономическими, эпидемиологическими, социальными факторами, сборочные предприятия вынуждены организовывать производство компонент, используя свои мощности. Это позволяет избежать задержек в производстве, снизить зависимость от поставщиков, повысить качество контроля используемых компонент, снизить время, необходимое для модернизации конечного продукта и производства индивидуализированных сложных технических объектов.

Использование информационных систем играет важную роль в организации функционирования производственно-сборочных предприятий, помогая управлять различными протекающими процессами (информационно-аналитическими, информационно-поисковыми, технологическими и т. д.), повышая эффективность функционирования и улучшая управление компонентами предприятия.

В процессе функционирования производственно-сборочные предприятия сталкиваются с различными проблемами:

- низкая производительность, связанная с недостаточным качеством планирования, неэффективным использованием ресурсов, оборудования и компонентов;

- превышение сроков выполнения контрактов, обусловленное отсутствием необходимых компонентов на складе, ограниченным количеством оборотных средств, непредвиденными поломками оборудования, связанные с несвоевременным проведением мероприятий по его техническому обслуживанию или недостаточной квалификацией персонала;

- простой ресурсов, компонентов, обусловленный недостаточным качеством планирования, закупкой необоснованно больших партий компонентов и ресурсов;

- перепроизводство сложных технических объектов, вызванное недостаточным качеством планирования, отсутствием прогнозирования спроса на производимую продукцию;

- производство бракованных сложных технических объектов, вызванное использованием при проведении технологических операций неподходящих компонентов, неквалифицированного персонала, отсутствием учета временных

особенностей технологических операций, недостаточным контролем проводимых технологических операций и т. д.;

- неоптимальное использование оборудования, вызванное большим количеством циклов «пуск/остановка», а также необоснованная работа оборудования в режиме «холостого хода», приводит к необходимости проведения обслуживания раньше планируемого срока.

Одним из подходов для решения вышеописанных проблем является использование в информационных системах механизма планирования с использованием различных [1] по структуре компонентов:

- нейро-нечеткий модуль, использующий нейрон Квана и Кэи, позволяющий выявлять в производственном процессе технологические операции, приводящие к браку, или операции, которые требуют проведения дополнительного контроля;

- модуль прогнозирования, использующий рекуррентные нейронные сети, позволяющие прогнозировать спрос на производимую продукцию;

- модуль «входной супервизор», позволяющий обрабатывать и проверять большие объемы поступающей информации, снижая вероятность возникновения ошибок;

- модуль моделирования, позволяющий устанавливать критерии эффективности функционирования производства и моделировать различные стратегии управления производственными процессами;

- модуль проектирования технологических процессов, использующий темпоральные нейро-нечеткие сети Петри, которые позволяют устанавливать траектории производства сложных технических объектов, выбирая оптимальную траекторию из множества допустимых траекторий производства.

Применение описанного подхода позволяет повысить эффективность планирования производства и функционирования информационной системы:

- за счет уменьшения количества технологических операций, приводящих к браку производимых сложных технических объектов;

- путем снижения общего времени работы оборудования в режиме «холостого хода», а также количество циклов «пуск/остановка»;

- за счет снижения количества невыполненных в срок контрактов;

- путем снижения количества производства невостребованных сложных технических объектов;

- за счет уменьшения количества неиспользуемых ресурсов и компонентов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modeling of Industrial and Technological Processes in Complex Systems Based on NeuroFuzzy Petri Nets / A. V. Bobryakov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021), Vladivostok, 7–8 October 2021. – Vladivostok, 2021. – Vol. 2096.

УДК 004.021

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОТКЛИКОВ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПОРЯДКОМ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е. М. БОРЧИК, Д. А. ДЕНИСЕВИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Для решения задач имитационного моделирования с целью оптимизации функционирования сложных производственных систем часто используются эволюционные алгоритмы случайного поиска – в частности, генетический алгоритм (ГА) и алгоритм 2Opt, имеющие параметры, требующие дополнительной настройки для обеспечения эффективной работы самих алгоритмов оптимизации (АО). Одним из этапов исследования АО является анализ чувствительности откликов в зависимости от изменения параметров АО.

Поставлена задача исследования чувствительности АО на основании оценки изменения отклика модели  $Y$  при изменении каждого параметра  $X$  на  $l$ -х уровнях ( $l \geq 2$ ). При моделировании каждая  $q$ -я компонента вектора  $X$  принимает последовательно значения на 1, 2, ...,  $l$  уровнях ( $X_{q1}, X_{q2}, \dots, X_{ql}$ ). Остальные компоненты вектора  $X$  при этом остаются неизменными и соответствуют нулевому уровню. Для каждой  $q$ -й компоненты проводится  $l$  модельных экспериментов, вычисляются отклики ( $Y_{1q}, Y_{2q}, \dots, Y_{lq}$ ).

Представление результатов имитационного эксперимента. Пусть в результате проведения имитационного эксперимента получен отклик  $Y$ , который представляет собой матрицу размерности  $m \times l$ , где  $m \geq 30$  – количество прогонов АО,  $l$  – количество уровней  $q$ -й компоненты АО, элементы матрицы  $Y$  – действительные числа. Предлагается использование статистических критериев для определения чувствительности на основе оценки разброса и математических ожиданий выборок отклика  $Y$  на  $l$  ( $l \geq 2$ ) уровнях параметра  $X$ .

Статистический анализ результатов имитационных экспериментов проводится в два этапа: этап 1 – проверка гипотезы принадлежности выборок нормальной генеральной совокупности; этап 2 – определение чувствительности на основании оценок разброса и математического ожидания отклика. В результате статистического анализа  $l$ -выборкам отклика  $Y$  ставится в соответствии пара действительных неотрицательных чисел.

Этап 1. Для проверки гипотезы о принадлежности выборок нормальной генеральной совокупности выбраны критерии согласия Пирсона  $\chi^2$ , Колмогорова  $\lambda$ , Мизеса  $\omega^2$ . Если логические значения результатов применения критериев Пирсона и Колмогорова эквивалентны – на этом этап 1 оканчивается. Иначе – дополнительно применяется критерий Мизеса, результат работы которого принимается в качестве заключения о проверке.

Этап 2. Определение чувствительности на основе оценки разброса и математического ожидания отклика. В зависимости от вида распределений выборок  $y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})$ ,  $j = 1, \dots, l$ ,  $m \geq 30$ , для расчета оценок чувстви-

тельности разброса и математического ожидания выборки  $Y$  применяются методы параметрической либо непараметрической статистики.

Приведем проверяемые статистические гипотезы. Обозначим  $\Theta_{\sigma}(Y)$  оценку чувствительности разброса выборки  $Y$ . Тогда нулевая гипотеза  $H_0$ : дисперсии  $l$ -выборок равны; альтернативная гипотеза  $H_1$ : найдутся такие выборки, дисперсии которых различны. Обозначим  $\Theta_m(Y)$  оценку чувствительности математического ожидания выборки  $Y$ . Тогда нулевая гипотеза  $H_0$ : математические ожидания  $l$ -выборок равны; альтернативная гипотеза  $H_1$ : найдутся такие выборки, математические ожидания которых различны. Оценки характеристик выборки  $\Theta_{\sigma}(Y)$ ,  $\Theta_m(Y)$  используются в качестве оценки чувствительности параметров АО случайного поиска к изменению условий проведения эксперимента от уровня к уровню. Рассматриваемые статистические критерии основаны на вычислении некоторого наблюдаемого значения критерия  $Y_{nabl}$  и сравнения его с определенным критическим значением критерия  $Y_{krit}$ . В случае  $Y_{nabl} < Y_{krit}$  – нет оснований отвергнуть выдвинутую гипотезу и поскольку  $Y_{nabl} > 0$ ,  $Y_{krit} > 0$ , имеем  $0 < Y_{nabl} / Y_{krit} < 1$ . Иначе – выдвинутая гипотеза отвергается и отношение  $Y_{nabl} / Y_{krit} > 1$ . Результат работы статистических критериев будем сохранять в виде  $\Theta = Y_{nabl} / Y_{krit}$ . В результате статистического анализа отклику  $Y$  ставится в соответствие пара неотрицательных чисел  $\Theta_{\sigma}(Y)$ ,  $\Theta_m(Y)$ . При этом, чем больше данные значения, тем более чувствителен отклик к изменению параметра. В случае  $\Theta_{\sigma}(Y) > 1$  или  $\Theta_m(Y) > 1$  – выборки  $y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})$ ,  $j = 1, \dots, l$ ,  $m \geq 30$  принадлежат различным генеральным совокупностям, АО чувствителен к изменению условий эксперимента от уровня к уровню.

Проведены исследования генетического алгоритма (ГА) и алгоритма 2Opt, примененные к задаче упорядочивания заказов на промышленном предприятии. Параметры ГА варьировались между значениями 500, 10000, 20000, 30000 и 50000, в то время, как параметр поколения для алгоритма 2Opt составлял 500. Оптимальное решение задачи заключалось в минимизации стоимости переналадки оборудования. Исследовались отклики алгоритмов оптимизации, включая оптимальную стоимость переналадки и время работы АО. При этом была изучена зависимость времени работы и эффективности ГА от параметра поколения, которая оказалась значительной. Также была исследована зависимость оптимальной стоимости переналадки оборудования при замене ГА на 2Opt, которая также оказалась значительной, указывая на различия в подходе данных алгоритмов к решению оптимизационной задачи. Чувствительность оптимальной стоимости переналадки оборудования при замене параметров поколения ГА на трех уровнях (500, 20000, 50000) также оказалась высокой, а на уровнях 20000, 30000, 50000 – пограничной между низкой и высокой. В целом, исследование показало, что точность решения задачи оптимизации возрастает с увеличением значения параметра поколения, но при этом время решения также увеличивается. Кроме того, с увеличением значения параметра поколения решения оптимизационной задачи становятся меньше чувствительными к последующему увеличению параметра поколения.

УДК 004.032.26

## АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ И СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

Н. В. ВЫГОВСКАЯ, М. В. ПАШКЕВИЧ, Р. В. МИЛЕВСКИЙ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Медицинские изображения играют существенную роль в диагностике и лечении различных заболеваний и состояний пациентов. В [1] приводится краткий обзор медицинских систем с искусственным интеллектом (ИИ) для анализа изображений, полученных при обследовании пациентов с помощью компьютерной томографии (КТ). Использование нейронных сетей для распознавания и классификации этих изображений позволяет повысить точность диагноза и сократить время, необходимое для выбора методов лечения пациентов.

Существует несколько алгоритмов [2] для распознавания медицинских изображений в нейронных сетях. Некоторые из наиболее популярных алгоритмов включают следующее.

1. Сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN) – это один из самых распространенных алгоритмов для анализа и классификации медицинских изображений. CNN использует специальные слои свертки для обнаружения визуальных признаков на изображениях и последующую классификацию.

2. Рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) – алгоритмы, которые принимают во внимание последовательность медицинских изображений для анализа и классификации.

3. Заполнение разреженности (Sparse Coding) – этот алгоритм используется для извлечения представлений изображений, которые являются разреженными и представляют важные признаки.

Это только некоторые примеры алгоритмов, используемых для распознавания медицинских изображений в нейронных сетях. Выбор конкретного алгоритма зависит от конкретного задания и доступных данных.

Сегментация является одним из этапов распознавания медицинских изображений. Этот процесс включает в себя выделение и классификацию различных структур или областей на изображении, таких как органы, опухоли или другие аномалии. Сегментация позволяет анализировать и интерпретировать медицинские изображения, что помогает в диагностике и лечении различных заболеваний.

Проведен обзор литературы с использованием системного подхода к анализу алгоритмов для сегментации медицинских изображений в нейронных сетях. Особое внимание следует уделить алгоритму Канни [3] в связи его эффективностью в сравнении с другими алгоритмами.

Алгоритм Канни (Canny edge detection) – это алгоритм обнаружения границ на изображениях. Используя этот алгоритм, можно выделить контуры объектов на медицинских изображениях. Алгоритм Канни состоит из нескольких этапов.



1. Сглаживание (Gaussian Smoothing). Изображение сглаживается с помощью фильтра Гаусса, чтобы уменьшить шум. Пусть исходное изображение будет задано яркостью  $x(m, n)$ . Гауссово размытие с радиусом  $r$  вычисляется по формуле

$$y(m, n) = \frac{1}{2\pi r^2} \sum_{u, v} e^{-\frac{(u^2+v^2)}{2r^2}} x(m+u, n+v) . \quad (1)$$

2. Расчет градиентов (Gradient Calculation). Вычисляются градиенты интенсивности пикселей в изображении, чтобы найти места сильных изменений яркости. Применяется дискретный дифференцированный оператор Собеля, который вычисляет приближенное значение градиента в каждой точке. Результатом применения оператора Собеля в каждой точке изображения является либо вектор градиента яркости в этой точке, либо его норма. Для обнаружения изменений интенсивности в горизонтальном  $d_x$  и вертикальном  $d_y$  направлении вычисляются величина  $M$  края и направление градиента  $\theta$  по формулам:

$$M = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} ; \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d_y}{d_x}\right) . \quad (3)$$

3. Подавление не-максимумов (Non-maximum Suppression). Удаляются все точки, которые не являются локальными максимумами в направлении градиента. Это позволяет сохранить только тонкие границы объектов.

4. Пороговая обработка (Thresholding). Оставшиеся точки классифицируются на основе двух порогов (нижнего и верхнего). Точки, значения градиента которых превышают верхний порог, считаются границами, а те, которые находятся между нижним и верхним порогами, относятся к подозрительным границам, которые будут сохранены только в случае их связности с границами.

Алгоритм Канни является популярным и широко используется для обработки и анализа медицинских изображений, таких как рентгеновские снимки, МРТ-снимки и томографические изображения. Он позволяет выделить границы объектов на изображении и провести дальнейший анализ и классификацию.

Алгоритмы CNN и Канни были использованы при генерации нейронной сети, предсказывающей диагноз пациента по изображению с рентгеном лёгких, и доказали свою эффективность.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Berezovsky, V.** Justification for selecting the neural network type for inclusion in the architecture of the developed medical information system / V. Berezovsky, N. Vygovskaya // BIO Web Conf. 84, 03006 (2024).
2. **Yadav, S. S.** Classification of medical images based on a deep convolutional neural network for the diagnosis of diseases / S. S. Yadav, S. M. Jadhav // J Big Data 6, 113 (2019).
3. Высокопроизводительный метод обнаружения границ на медицинских изображениях. Научный результат / Е. С. Сойникова [и др.] // Информационные технологии. – 2016. – № 1 (3). – С. 4–9.

УДК 621.83

## РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ КАК ОДИН ИЗ ЭТАПОВ ПОДГОТОВКИ СОВРЕМЕННОГО ВЫСОКОПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ИНЖЕНЕРА

Д. С. ГАЛЮЖИН, Е. Г. КРИВОНОГОВА, Д. А. КОВАЛЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Реверс-инжиниринг – это процесс анализа и изучения уже существующего продукта или системы для определения ее структуры, функций, алгоритмов и компонентов. Целью реверс-инжиниринга является раскрытие внутренней работы продукта или системы, чтобы получить полное понимание ее функциональности, геометрии и дизайна.

Реверс-инжиниринг в машиностроительном производстве представляет собой процесс анализа и изучения готового изделия или компонента с целью определения его структуры, функциональности и методов производства. Это может быть полезно для создания аналогичных или модернизированных изделий.

В настоящее время в машиностроительном производстве применяются различные способы и методы реверс-инжиниринга для обратного проектирования и анализа изделий. Наиболее широко используются следующие основные методы: фотограмметрия, которая может быть использована для создания точных трехмерных моделей с использованием фотографий изделий; 3D-сканирование, которое позволяет получить точную трехмерную модель объекта с помощью специального сканера; шаблонное моделирование, предназначенное для более детального анализа и измерения; деструктивный анализ, который включает в себя разбор или разрушение объекта с целью изучения его составных частей, структуры и свойств материалов; анализ и перебор параметров, подразумевающий изменения различных параметров изделия или системы, а затем анализа их влияния на его свойства или функциональность.

Эти методы и способы могут использоваться в комбинации друг с другом для получения наиболее точного представления о структуре и свойствах изделий, что, в свою очередь, может быть использовано для оптимизации процесса проектирования и производства в машиностроении. Реверс-инжиниринг играет важную роль в развитии новых и улучшении существующих технологий изготовления изделий.

В Белорусско-Российском университете группой специалистов была создана модель наружной фары по заказу ОАО «Зенит» (г. Могилев). Ранее накопленный научно-технический потенциал коллектива позволил в заданные сроки и требуемом качестве создать трехмерную модель наружной фары для спецтехники общего назначения. Полученная компьютерная модель позволяет использовать ее при современном проектировании пресс-формы для литья алюминия под давлением, а также дополнять модели техники при конструировании различных машин.

УДК 004

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОГО ЛИНЕЙНОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПИЩЕВЫМИ ПРИВЫЧКАМИ И СОСТОЯНИЕМ ЗДОРОВЬЯ

Е. А. ЗАЙЧЕНКО, Э. А. КАПЕЛЬКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Множественный линейный регрессионный анализ дает возможность исследовать связи между одной зависимой переменной и некоторым количеством независимых переменных, параметры определяются методом наименьших квадратов, вместо линии регрессии используется гиперплоскость. Это позволяет значительно увеличить коэффициент детерминации модели и исходного массива данных.

В качестве генеральной совокупности в представленной работе был использован массив данных «Питание и здоровье» (The Eating & Health Module Dataset), в котором собраны сведения о том, как люди оценивают самочувствие, сколько времени они тратят на занятия спортом, досуг, работу, какова структура их рациона. Массив имеет достаточный объем для проведения исследований.

При проведении множественного линейного регрессионного анализа данных важно выбрать из множества переменных зависимую переменную. Такой зависимой переменной была выбрана переменная, содержащая оценку здоровья респондентом в диапазоне от «отлично» до «плохо», а переменные, содержащие более объективные данные о весе респондентов, особенностях рациона, количестве различных категорий продуктов и напитков, величине дохода, времени, затраченном на занятия спортом (всего более 20 показателей), рассматриваются как независимые переменные.

Язык программирования python имеет широкие возможности для проведения математического и статистического анализа данных (пакеты pandas, sklearn, scipy). С помощью перечисленных средств и графической библиотеки matplotlib выполнено построение матрицы корреляций между первыми по значимости индексами анализируемого набора данных.

Обнаружены взаимосвязи, не определенные в данных целенаправленно и поддающиеся непредвзятой интерпретации. Так, построенный график показывает отрицательную корреляцию между индексом массы тела и оценкой самочувствия респондентов. Как и ожидалось, время, затраченное на физическую активность, имеет ярко выраженную положительную корреляцию с самочувствием человека. Было обнаружено, что участники опроса, потребляющие больше мяса, птицы и рыбы, имеют более высокую оценку состояния здоровья. Однако было выявлено, что наименее влияющие на самочувствие факторы – потребление газированных напитков и длительность сна.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о наличии статистически значимой связи между пищевыми привычками и состоянием здоровья.

УДК 519.8

## ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ УЛИЦ РЕАГЕНТАМИ

С. К. КРУТОЛЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Необходимо построить маршрут движения для коммунальных машин, который минимизирует время обработки заданного массива улиц города. В задаче необходимо учитывать, что:

– обработка производится несколькими машинами с различной грузоподъемностью;

– если реагента не хватает на обработку следующей улицы, машина возвращается на заправочную станцию;

– загрузка машин реагентами производится на одной станции, что вызывает появление очередей.

Для решения подобных задач используется реберно-взвешенный граф  $W = (G, L_W, L_T)$ . Вершины  $G_i$  представляют координаты начала и окончания участков обработки. Ребра  $L$  подразделяются на два типа. К первому типу относятся ребра  $L_W$ , на которых производится обработка реагентами – выполнение работ. Весовой функцией таких ребер выступает как количество реагента  $m_W$ , необходимое для выполнения работы, так и время ее выполнения  $t_W$ . Ко второму – ребра  $L_T$ , по которым происходит транспортировка к месту работы и обратно к заправочной станции. В этом случае весовая функция – время проезда по ребру  $t_T$ .

Целью является нахождение в графе  $W$  гамильтоновских циклов по ребрам первого типа  $L_W$  (туров)  $T$ :

$$T_1, \dots, T_m \subset W,$$

при этом величина

$$W(T_1, \dots, T_m) = \sum_{k=1}^m \sum_{l \in T_k} t_l$$

минимальна.

Каждый тур выполняется коммунальной машиной  $M$  и содержит набор работ  $L_W$ , переездов между ними  $L_T$ , загрузки  $D$  и ожиданием в очереди на загрузку  $S$ :

$$T = (M, L_W, L_T, D, S).$$

Ограничением на объем тура выступает грузоподъемность коммунальной машины  $M_Q$ :

$$M_Q \geq \sum_{l \in L_W \subset T} m_W. \quad (1)$$

Решить поставленную задачу методом полного перебора вариантов не представляется возможным. Например, в г. Могилеве имеется список из 70 участков дорожной сети, которые относятся к первой очереди на обработку. Используется до 10 автомобилей пяти видов грузоподъемности. Общее число возможных комбинаций выполнения  $n$ -работ определяется как  $n!$

и для Могилева представляет цифру большую, чем  $10^{240}$ . При решении подобных задач [1, 2] предлагается использовать различные жадные алгоритмы с применением эвристических правил.

Однако все предложенные алгоритмы не используют ограничение (1) на формирование тура и формирование вторичной очереди на загрузку после возвращения машин из очередного тура.

Для формирования собственных эвристических правил разработан алгоритм полного перебора последовательности выполнения работ. Удалось опеределить оптимальные туры  $T_1, \dots, T_m$  для выполнения десяти работ  $L_W$  в графе  $W$  тремя машинами. Использование этого алгоритма для большего числа работ абсолютно неприемлемо в реальном производстве, где на формирование путевых листов отводится не более 30 мин. Анализ возможных вариантов туров позволил сформировать следующие эвристические правила.

1. Сортируем список работ по возрастанию времени проезда до пункта загрузки реагентами.

2. Сортируем список автомобилей по увеличению грузоподъемности.

3. Загружаем автомобили в стек. Выезд из стека возможен после освобождения пункта загрузки.

4. Запускаем цикл по формированию туров. В тур добавляется первая работа из списка работ, если она удовлетворяет следующим условиям:

– не попала в предыдущие туры;

– выполняется условие (1) по грузоподъемности машины;

– время проезда от текущего положения  $G$  машины до вершины  $G_{wi}$  начала работы минимально.

5. Процесс формирования туров заканчивается при отсутствии работ в списке.

Для проверки эффективности данного алгоритма проведены сравнения оптимальных решений и решений по предлагаемому алгоритму для различных параметров работ и машин.

Предложенный эвристический алгоритм позволяет сформировать циклы обхода ребер  $L_W$  графа  $W$  за время, превышающее оптимальное не больше, чем 10 %.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гимади, Е. Х. Задача о двух коммивояжерах с ограничениями на пропускные способности ребер графа с различными весовыми функциями / Е. Х. Гимади, А. М. Истомин, И. А. Рыков // Вестн. НГУ. – 2014. – Т. 14, вып. 3. – С. 3–18.

2. Nuriyeva, F. New heuristic algorithm for multiple traveling salesman problem / F. Nuriyeva, G. Kizilatesa // TWMS J. App. Eng. Math. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 101–109.

УДК 004.35

## ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ИЗУЧЕНИЮ RAID

С. К. КРУТОЛЕВИЧ, В. М. ПРУДНИКОВ, И. О. БАРАБОЛЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Технология RAID позволяет объединить несколько физических носителей данных в один логический накопитель [1]. При этом возможно использовать различное количество носителей, разные логические топологии соединений и алгоритмов формирования контрольных сумм. Как следствие, получаются разнообразные результаты по надёжности хранения данных и производительности получаемого логического накопителя данных, что реализуется в так называемых уровнях RAID (RAID Level).

По причине достаточной сложности технологии RAID её практическое изучение вызывает понятные трудности у студентов. Для качественного изучения технологии разработана виртуальная лабораторная работа, позволяющая изучать технологию RAID в режимах теории, обучения и практики [2].

В режиме изучения теории обучаемые получают основные знания о технологии RAID: что такое RAID, преимущества и недостатки различных уровней RAID, а также другие важные особенности. Информация представлена в текстовом и графическом виде.

В режиме обучения студентам предоставлены возможности для изучения особенностей логических топологий и получаемых преимуществ различных уровней RAID. Реализован интерактивный интерфейс диалога с обучаемым.

В режиме практики студент выполняет в виртуальной среде построение логической топологии заданного уровня RAID в графическом интерфейсе. Реализована оперативная обратная связь, указывающая на возникающие ошибки. В процессе работы приобретаются навыки, требуемые для осмысленного применения технологии RAID, выполняя построение логической топологии вручную.

Использование цифровых технологий позволило реализовать динамичную интерактивную среду обучения студентов в виде виртуальной лабораторной работы по изучению RAID.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гук, М. Аппаратные средства IBM PC: энциклопедия / М. Гук. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2005. – 923 с.: ил.
2. Прудников, В. М. Разработка алгоритма для интерактивного приложения по изучению RAID-массивов / В. М. Прудников, И. О. Бараболя, Е. О. Исакович // Современные цифровые технологии: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. – Барнаул, 2023. – С. 304–307.

УДК 629.33-004

## АЛГОРИТМЫ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. В. КУТУЗОВ, С. А. РЫНКЕВИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Оснащение современных автотранспортных средств (АТС) средствами бортовой микроэлектроники позволяет оперативно выявлять неисправности и опасные отказы, а также прогнозировать появление новых дефектов [1]. Это повышает ресурс трансмиссии и других механизмов АТС.

В то же время для повышения эффективности оперативной оценки технического состояния (ТС) АТС необходимо использовать современные алгоритмы, полученные на основе новых методов сбора, преобразования, анализа и передачи информации.

Алгоритмы в бортовой системе управления, диагностики и мониторинга процессами движения АТС реализуются на основе непрерывного измерения и анализа совокупности информационных параметров [2].

Измеряемые информационные параметры (ИП), несущие информацию о техническом состоянии АТС, могут иметь различную физическую природу. Они могут быть механическими, гидравлическими, тепловыми, электрическими и параметры длительности. К группе механических ИП принадлежат частоты вращения валов двигателя, турбинного вала гидротрансформатора (ГДТ) и выходного вала коробки передач:  $n_d$ ,  $n_T$ ,  $n_B$ , об/мин. Гидравлические ИП – это главное давление в масляной гидролинии  $p_{гд}$ , Па; давление перед фильтром масляного канала  $p_\phi$ , Па; гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента  $\Delta p_\phi$ , Па; давление в подводящих к фрикционным муфтам гидролиниях  $p_{\phi i}$ , Па. Параметры электрической природы и длительности – это длительность управления давлением во фрикционе при смене ступеней  $t_p$ , с; эталонная длительность скольжения фрикционов коробки передач (КП)  $t_\varepsilon$ , с; предельная длительность скольжения фрикционов КП  $t_{\varepsilon.п}$ , с; сигнал указателя отказа датчика скорости  $D_v$ ; напряжение в электромагнитных клапанах  $U_{эк}$ , В; сила тока в них  $I_{эк}$ , А; количество переключений ступеней в КП  $k_{кп}$  и блокирований ГДТ  $k_{гдт}$ ; электрический сигнал указателя уровня масла в баке  $s_\zeta$ .

Современные алгоритмы должны быть комплексными, отслеживая работоспособность всех основных механизмов автомобиля – трансмиссии, двигателя (с подсистемой контроля состава отработавших газов), подвески, тормозной системы и рулевого управления.

В автомобилях, оснащенных гидрофицированными трансмиссиями (к ним относятся карьерные автосамосвалы с гидромеханическими передачами), на

дисплей водителя выводится важная информация о состоянии гидравлического привода, фрикционов переключения передач, давлении и температуре масла в гидравлических магистралях [3].

В качестве критерия, который характеризует факт перехода АТС в неработоспособное ТС (если значения одного или нескольких ИП выходят за границы области работоспособности), принят коэффициент ресурса  $\Delta\xi_i$ . Возрастание коэффициента ресурса  $\Delta\xi_i$  показывает, что значение информационного параметра находится в благоприятной зоне. Если же коэффициент ресурса, уменьшаясь, стремится к нулю, то это ТС можно трактовать как появление постепенного отказа. Коэффициент ресурса  $\Delta\xi_i$  через среднее  $\xi_{срi}$  и граничное  $\xi_{i}^{\Gamma}$  значения вычисляется по выражению

$$\Delta\xi_i = \left| \xi_{срi} - \xi_{i}^{\Gamma} \right|.$$

Авторами получен комплекс предельно-допустимых значений ИП, которые использованы в алгоритмах бортовой системы управления и диагностирования как ограничения [1, 3].

В процессе испытаний бортовой системы управления и диагностирования в составе груженого карьерного автосамосвала БелАЗ-7555 была отмечена интересная особенность. Оказывается, адаптивные алгоритмы, в отличие от жестко запрограммированных (т. е. тех, которые используют массивы неизменяемых данных), оказываются более эффективными. Адаптивные алгоритмы способны «приспосабливаться» к изменяющимся внешним условиям и могут выдавать лучшие результаты путём постоянной подстройки под входные данные.

Современные информационные технологии обработки данных позволяют успешно решать хорошо структурированные задачи, по которым имеется совокупность входной информации, характеризующей многообразие условий эксплуатации АТС.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рынкевич, С. А.** Проектирование, эксплуатация и диагностика мобильных машин / С. А. Рынкевич, В. В. Кутузов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 223 с.: ил.
2. **Рынкевич, С. А.** Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий / С. А. Рынкевич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.
3. **Рынкевич, С. А.** Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние проблемы и перспективы развития / С. А. Рынкевич // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 77–88.



УДК 004

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЕКТА WOKWI ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ РАБОТЕ С МИКРОКОНТРОЛЛЕРАМИ

А. В. КУШНЕР, И. А. ЧЕРКАСОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Микроконтроллеры широко используются во множестве приложений и устройств, включая электронные системы в автомобилях, бытовую электронику, медицинское оборудование, промышленные контроллеры, робототехнику, умные устройства и IoT (интернет-вещей).

Для обучения студентов специальностей ПИр и АСОИр работе с микроконтроллерами в новых учебных планах введены такие дисциплины, как «Проектирование аппаратно-программных комплексов», «Командная разработка программно-аппаратных комплексов», «Технология интернет-вещей». На этих дисциплинах студенты должны изучать принципы работы микроконтроллеров и управляющих устройств на их основе, а также их программирование. На лабораторных занятиях предполагается использовать микроконтроллеры Arduino Uno, ESP32, наборы цифровых и аналоговых датчиков, экраны, актуаторы и другие подключаемые к микроконтроллерам устройства. Предполагается проводить занятия непосредственно на реальных микроконтроллерах, но на начальных этапах обучения это не всегда удобно, т. к. подключение и настройка микроконтроллеров требует определенных навыков и знаний, которых у только начавших обучение студентов может быть недостаточно, кроме того, при работе с реальными микроконтроллерами существует риск повреждения оборудования, что может привести к необходимости замены или ремонта оборудования. Поэтому следует, особенно на начальных этапах обучения, проводить сборку, программирование и испытание электрических схем на базе микроконтроллеров на онлайн-платформе Wokwi (доступ по адресу <https://wokwi.com/>). Эта онлайн-платформа позволяет моделировать и отлаживать электронные схемы с использованием микроконтроллеров. В ней можно использовать различные компоненты, такие как резисторы, конденсаторы, индуктивности, микросхемы, различные микроконтроллеры и т. д. Данная платформа поддерживает различные модели микроконтроллеров, таких как Arduino, ESP8266, ESP32, STM32 и др. Программирование этих микроконтроллеров можно осуществлять на языках: C++, MicroPython, Rust и т. д. Большим достоинством онлайн-платформы Wokwi является то, что разработанные программы можно непосредственно переносить на реальные микроконтроллеры. Таким образом, студенты могут виртуально собрать электрическую схему на базе нужного микроконтроллера, разработать для нее программу и испытать ее работоспособность и только после этого собирать такую схему в реальности и переносить на нее программу.

Для начала работы с Wokwi необходимо перейти по адресу сайта и затем создать учетную запись, которая позволит сохранять и совместно использовать

проекты с другими людьми. После этого необходимо перейти в раздел «My Project» и либо создать новый проект через кнопку «New Project», либо воспользоваться уже существующим проектом. Рабочее поле уже существующего проекта Wokwi показано на рис. 1.

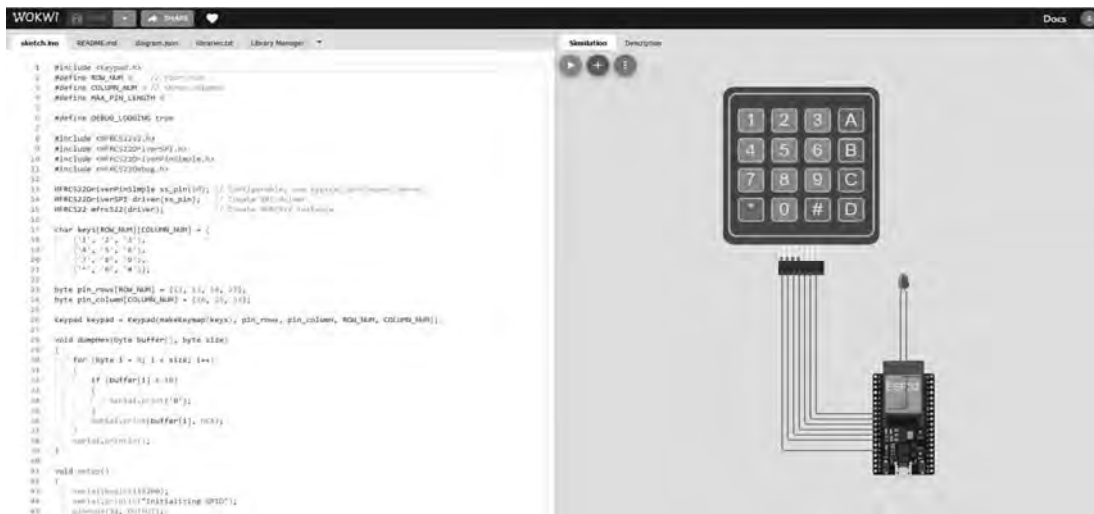


Рис. 1. Рабочее поле проекта Wokwi

Как видно из рис. 1, на левой стороне рабочего поля видны следующие ярлыки: sketch.ino, readme.md, diagram.json, libraries.txt, Library Manager, там же содержится значок, который позволяет добавлять или редактировать ярлыки.

Под ярлыком sketch.ino находится программа для микроконтроллера, readme.md содержит комментарии к проекту, diagram.json – это текстовое поле, в котором описываются электрические элементы, их положение, соединения и т. д. Ярлык libraries.txt содержит описание всех используемых библиотек. Library Manager позволяет подключить новые библиотеки, как имеющиеся в наличии, так и загруженные пользователем.

С правой стороны рабочего поля находится электрическая схема, элементы для которой можно выбрать нажатием на кнопку «+». После выбора элемента его можно перетаскивать, вращать и размещать в рабочей области. Соединение компонентов друг с другом осуществляется через соединительные линии, которые активируются однократным нажатием одной из контактных площадок элементов, каждое последующее нажатие устанавливает место изгиба проводника. Для соединительной линии можно выбрать цвет. Запуск эмуляции электрической схемы осуществляется нажатием на кнопку в виде треугольника, развернутого в правую сторону. При этом снизу справа появляется окно серийного монитора, аналогичного такому монитору на Arduino IDE. При этом можно взаимодействовать с компонентами схемы и наблюдать результаты в реальном масштабе времени. После завершения проекта его следует сохранить в виде архива и в последующем использовать для реальной схемы.

Таким образом, можно сделать вывод, что онлайн-платформа Wokwi предоставляет удобный способ экспериментировать с электроникой без необходимости использования физического оборудования.

УДК 528

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ КООРДИНАТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

С. О. МАКАРОВ<sup>1</sup>, А. Д. ТИХОНОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский университет транспорта (МИИТ)<sup>2</sup>Государственный университет по землеустройству  
Москва, Россия

Благодаря активному развитию вычислительных и телекоммуникационных технологий появилась возможность использования высокоточных эфемерид, алгоритмов с задержкой и данные полученных с дифференциальных сетей, вследствие чего стало возможным использование не только освоенных классических методов обработки спутников данных, но и более современных.

В начале двухтысячных годов XXI в. в NASA (Nasa Jet Propulsion Laboratory) был разработан метод высокоточных координатных определений или по-другому Precise Point Positioning (далее «PPP»). Однако термин «метод высокоточных координатных определений» еще не устоялся в российской геодезической терминологии, а какая-либо регламентирующая информация в зарубежном и российском научном сообществах в настоящее время отсутствует, вследствие чего принято сохранять аббревиатуру PPP.

Для реализации PPP-алгоритма требуются высокоточные эфемериды, локальные модели ионосферы и тропосферы, помимо этого вводятся поправки за движение литосферных плит; приливы, отливы и иные факторы, оказывающие влияние на получаемую точность. Метод не является разностным и не обладает свойством компенсации односторонне действующих ошибок, поэтому надежное определение его современных возможностей является актуальной задачей.

На сегодняшний день существует возможность обработки данных по PPP-алгоритму как с использованием программных обеспечений, так и интернет-сервисов. В качестве интернет-сервисов могут быть названы следующие: Automatic Precise Points Positioning (APPS), Canadian Spatial Reference System Precise Points Positioning (CSRS-PPP), GNSS Analysis and Positioning Software (GAPS), magic-PPP (magic GNSS), Trimble-RTX и ряд других. В свою очередь, среди программных обеспечений: GPS Toolkit, Bernese, Waypoint GrafNET, GIPSY-OASIS, RTKLIB.

Главные отличия интернет-сервисов от программных обеспечений заключаются в том, что:

- 1) интернет-сервисы предоставляют бесплатную возможность обработки данных по PPP-алгоритму;
- 2) время обработки по PPP-алгоритму с использованием интернет-сервисов несколько меньше, чем при использовании программных обеспечений.

Однако постепенно развивается не только обработка по алгоритмам PPP-AR, PPP-interger, но и по PPP-RTK.

PPP-RTK – метод высокоточного абсолютного определения местоположения с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений и использованием атмосферных коррекций в пределах локальной области.

Кинематика в реальном времени позволяет получить поправки к разрешению целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений, а PPP – к эфемеридно-временной информации. PPP-RTK реализуется через поток поправок в формате RTCM-SSR (State Space Representation).

На сегодняшний день существует платная возможность реализации PPP-RTK с использованием специализированных платных интернет-сервисов [1].

Данные решения доступны не так давно и обычно они платные, поэтому пока не очень распространены на территории нашей страны, хотя и в этом направлении есть положительные изменения.

Примером может служить использование Beidou B2b service (B2B – это специализированный коррекционный сигнал, прием которого открыт в определенных приемниках) [2]. Для того чтобы воспользоваться данным сервисом, необходим современный спутниковый приемник, способный, помимо сигналов с навигационных спутников, принимать поправки с соответствующих геостационарных:

1) спутник GEO-1 C59 – доступен на востоке России в районе Южно-Сахалинска (на большей части страны не виден);

2) спутник GEO-2 C60 – доступен в Новосибирске и Новосибирской области. Ограниченно доступен в Москве и Московской области на открытых пространствах на высоте около 10 град над горизонтом (необходимо понизить маску принимаемых спутников, отсекаемых по умолчанию).

Спутники GEO-3 C60 и GEO-4 C61, находящиеся на этапе тестирования, в ближайшее время еще расширят территории, где будет возможен прием данных сигналов.

По утверждениям производителя точность определения координат составляет 1...2 дм, что конечно хуже точности обычного RTK, но подходит для большого круга задач.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров, С. О.** Сравнение точности геодезических сетей, координаты которых определены с использованием метода высокоточных координатных определений и классической постобработкой / С. О. Макаров, А. Д. Тихонов // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 6. – С. 103–108.

2. **Тихонов, А. Д.** Использование PPP-алгоритма обработки данных для создания геодезических сетей / А. Д. Тихонов, А. А. Кочиев // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2021. – № 6. – С. 464–468.

УДК 004.4

## АЛГОРИТМ РАБОТЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РЕНТГЕНОВСКОМ СНИМКЕ

А. Е. МИСНИК, И. И. МИЩЕНКО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Рентгеновские снимки широко используются в медицине для диагностики различных заболеваний. Однако интерпретация рентгеновских снимков является сложной задачей, требующей высокой квалификации и опыта врача-рентгенолога. В связи с этим существует потребность в автоматизированных системах распознавания дефектов на рентгеновских снимках, которые могли бы помочь врачам в диагностике заболеваний.

Для решения данной проблемы разработано специализированное программное обеспечение для распознавания дефектов на рентгеновских снимках.

Основные технологии при разработке.

1. Компьютерное зрение – область искусственного интеллекта, которая занимается обработкой и анализом изображений. Алгоритмы компьютерного зрения, представленные библиотеками NumPy, Matplotlib, Pillow и OpenCV, использованы для обнаружения и классификации дефектов на рентгеновских снимках.

2. Глубокое обучение – это подмножество машинного обучения, которое использует нейронные сети для решения различных задач, представленные при помощи библиотек Keras и Tensorflow.

3. Обработка языка – это область искусственного интеллекта, которая занимается обработкой и анализом текстовой информации. Алгоритмы обработки языка использованы для генерации отчетов о результатах распознавания дефектов на рентгеновских снимках и представлены библиотеками Gensim и spaCy.

Разработанное программное обеспечение представляет собой свёрточную нейронную сеть, которая обучена на наборе данных, состоящем из 1000 рентгеновских снимков с дефектными участками и 1000 рентгеновских снимков без них и обучалась различать эти участки и выявлять дефекты. Обучение производилось с использованием алгоритма обратного распространения ошибки, а сама она состоит из 10 слоев.

На входной слой подается рентгеновский снимок, представленный в виде матрицы пикселей. Размер слоя определяется разрешением рентгеновского снимка.

Скрытые слои выполняют обработку данных, поступающих с входного слоя. В нейронной сети используется восемь скрытых слоев, каждый из которых состоит из определенного количества нейронов. Нейроны в скрытых слоях связаны между собой синапсами, имеющими определенные веса. Веса синапсов определяются в процессе обучения нейронной сети.

Выходной слой выдает результат распознавания дефектов. Выходной слой состоит из двух нейронов. Один нейрон выходного слоя соответствует классу «дефект», а другой нейрон выходного слоя – классу «нет дефекта».

Алгоритм работы нейронной сети состоит из пяти шагов.

1. Обработка снимков перед непосредственным распознаванием, т. е. отсортировка бракованных снимков. Это может быть плохое качество снимка, неправильный формат, посторонние предметы, из-за которых не видна область исследования.

2. Предобработка снимка. Она включает в себя изменение яркости и контрастности исходного изображения для более точного распознавания.

3. Определение контуров исследуемой области.

4. Непосредственное распознавание дефектов на обработанном снимке.

5. Вынесение вердикта об аномальности области исследования.

На рис. 1 представлен результат распознавания дефектов нейронной сетью.



Рис. 1. Результат работы и распознавания дефектов нейронной сетью

Нейронная сеть оценена на наборе данных из 200 рентгеновских снимков с дефектами и без дефектов. Нейронная сеть правильно классифицировала 85 % рентгеновских снимков с дефектами и 83 % без дефектов. Общий процент точности составил 84 %.

Результаты показывают, что разработанная нейронная сеть может использоваться для автоматизированного распознавания дефектов на рентгеновских снимках с высокой точностью, но требует усовершенствования, в частности, добавления алгоритма нахождения контуров дефектного участка.

УДК 621.39

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АТАКИ СПУФИНГА В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ И ДОСТАВКИ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

Е. В. ОПАРИН, Е. В. ОПАРИНА

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия

Комплексная система синхронизации и доставки шкалы времени является важным элементом современных и перспективных телекоммуникационных сетей, вследствие чего системы синхронизации и доставки шкалы времени постоянно подвержены атакам различной природы со стороны организованных злоумышленников, в том числе и атакам спуфинга [1–3].

На рис. 1 представлена разработанная модель атаки спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени, которая содержит все основные этапы воздействия организованного злоумышленника, независимо от применяемых технологических решений построения сетей связи и состава инструментария атакующего.

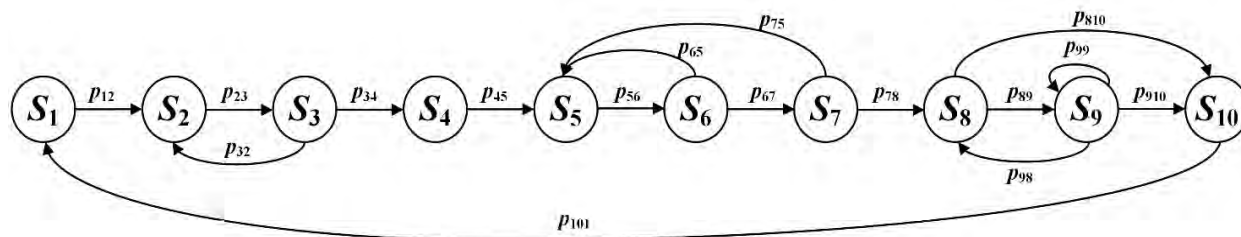


Рис. 1. Модель действий злоумышленника, реализующего атаку спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени

Указанная модель (см. рис. 1) включает в себя следующие состояния:  $S_1$  – исходное состояние;  $S_2$  – сбор злоумышленником исходных данных об объекте атаки;  $S_3$  – обработка злоумышленником полученных исходных данных;  $S_4$  – разрыв соединения в выбранном сегменте атаки;  $S_5$  – состояние, когда злоумышленник осуществляет идентификацию своего узла в системе;  $S_6$  – состояние, когда злоумышленник осуществляет аутентификацию своего узла в системе;  $S_7$  – состояние, когда злоумышленник осуществляет авторизацию своего узла в системе;  $S_8$  – состояние, когда злоумышленник осуществляет мероприятия, направленные на поддержание своего легитимного присутствия в системе;  $S_9$  – состояние, когда злоумышленник осуществляет генерирование вредоносных сообщений;  $S_{10}$  – завершение атаки [4, 5].

Для оценки вероятностно-временных характеристик атаки спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени построена имитационная модель в среде *AnyLogic* (рис. 2).

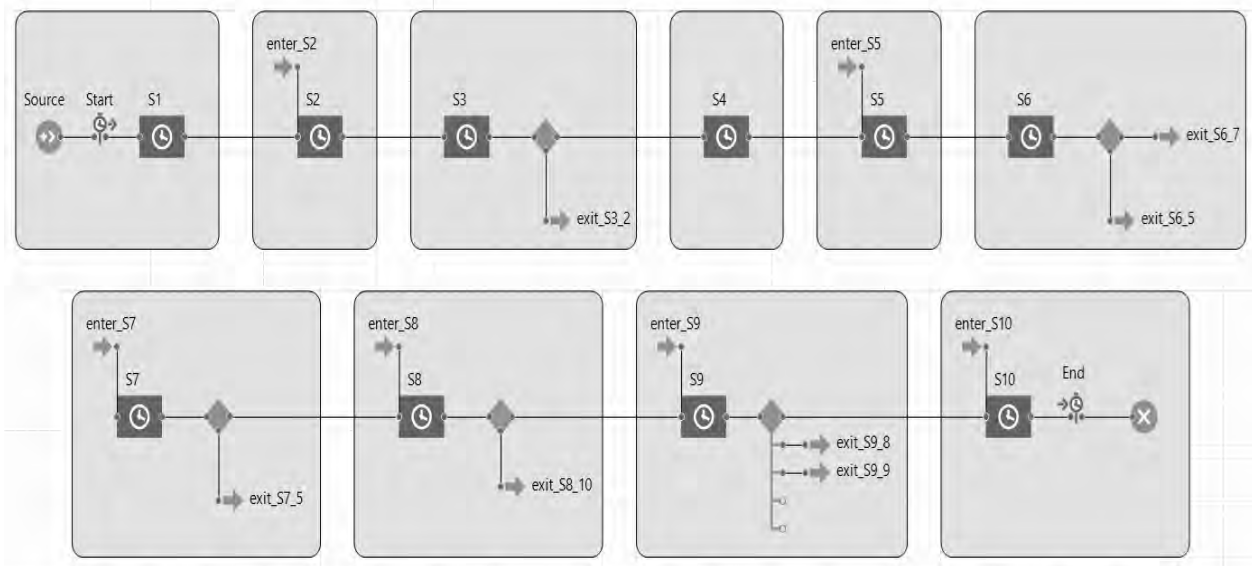


Рис. 2. Имитационная модель процесса проведения атаки спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени

По результатам проведенного имитационного моделирования получено, что среднее время атаки спуфинга составляет 347,49 ч, что примерно равно 14,48 сут.

В итоге разработана имитационная модель действий злоумышленника при реализации атаки спуфинга в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени, которая независима от состава исходных данных. Модель полностью работоспособна и адекватна. Полученные результаты могут служить основой, анализируя которые специалисты информационной безопасности могут оптимально распределять имеющиеся в своем распоряжении ресурсы, чтобы наиболее эффективно блокировать действия организованного злоумышленника.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Канаев, А. К.** Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе её энтропийного анализа / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 505–514.
2. Вербальная модель процесса взаимодействия телекоммуникационной сети объекта с системой злоумышленника / Н. В. Евглевская [и др.] // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2020. – № 7. – С. 265–269.
3. Модели компьютерных атак на программно-конфигурируемые сети / И. Б. Саенко [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 37–47.
4. **Алексеев, А. И.** Сети, чувствительные ко времени, и их использование на железнодорожном транспорте / А. И. Алексеев, А. К. Канаев // СПБНТОРЭС: тр. ежегодной науч.-техн. конф. – 2023. – № 1 (78). – С. 202–205.
5. **Канаев, А. К.** Использование служебного канала для построения сети синхронизации в OTN / А. К. Канаев, Э. В. Логин, Ф. А. Прошин // СПБНТОРЭС: тр. ежегодной науч.-техн. конф. – 2022. – № 1 (77). – С. 144–147.



УДК 004.42

## ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ю. Д. СТОЛЯРОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В работе представлена программа, позволяющая виртуально продемонстрировать работу ЭВМ при проведении вычислений с числами с плавающей запятой. Использование чисел с плавающей запятой позволяет расширить диапазон используемых чисел, а также увеличить точность представления дробной части числа. В отличие от чисел с фиксированной запятой эти числа содержат порядок и мантиссу. Хотя для хранения порядков чисел требуется дополнительная память, это компенсируется увеличением абсолютной точности дробной части числа. Так как при вводе чисел используется обычное десятичное исчисление, исходная информация преобразуется в двоичный код. Специфика вычислений требует определенной структуры представления информации в ЭВМ. После перевода в двоичный код перед проведением вычислений производится выравнивание порядков чисел, их нормализация, а затем расчеты производятся поразрядно для порядков и мантисс. Результат, полученный в двоичном коде, затем преобразуется в обычный десятичный код. Точность представления результатов вычислений определяется разрядностью используемой ЭВМ и типом представления данных. В нашем случае тип представления данных – float. Программа работает в двух режимах – пошаговом и автоматическом. Программа написана с использованием языка C++.

Работа программы демонстрируется в динамическом режиме с использованием анимации. Для наглядности работы приведены только промежуточные результаты расчетов. Перед выполнением каждого этапа расчетов формулируется последовательность выполнения необходимых операций. Затем идет пошаговая демонстрация выполнения указанных действий с использованием цветовой гаммы. Исходные данные – красного цвета, результат – зеленого. Этап завершается соответствующими комментариями полученных данных, вплоть до получения окончательного результата. В ЭВМ все арифметические операции сводятся к операции сложения. Для примера рассмотрим сложение двух чисел 5,36 и 3,52 с плавающей запятой. Преобразуем эти числа в двоичный код, отдельно целые и дробные части (табл. 1).

Порядок первого числа равен 3, а второго – 2.

Для дальнейшей работы представим числа в нормализованном виде, т. к. они хранятся в компьютере (табл. 2).

Табл. 1. Перевод данных в двоичный код

Слагаемые	Исходные данные	Двоичный код
Первое число	5,36	<b>101,101010111</b>
Второе число	3,52	<b>11,100001010</b>

Табл. 2. Представление информации в нормализованном виде

Слагаемые	Исходные данные	Двоичный код
Первое число	5,36	0,1010101110
Второе число	3,52	0,1110000101

Для сложения чисел необходимо уравнивать их порядки путем увеличения меньшего порядка до порядка большего числа (табл. 3), в нашем случае на единицу (3-2).

Табл. 3. Уравнивание порядков чисел

Слагаемые	Исходные данные	Двоичный код
Первое число	5,36	0,10101011100
Второе число	3,52	0,01110000101

После сложения полученных чисел по указанным выше правилам полученную сумму 1,000111000010 представим в нормализованном виде, т. е. сдвинем на один разряд вправо – 0,1000111000010. Порядок при этом равен 4. Затем преобразуем результат в десятичный вид. В нашем примере при использовании чисел с плавающей запятой сумма равна 8,87892625, для чисел с фиксированной запятой сумма равна 8,87125732. Точная сумма равна 8,88. Это говорит о том, что при использовании чисел с фиксированной запятой при ограничении количества знаков в дробной части погрешность при преобразовании исходной информации в двоичный код приводит к значительной погрешности в окончательном результате.

Изложенное выше позволяет четко понять выполнение компьютером действий над числами с плавающей запятой. При пошаговом выполнении программы на каждом этапе можно визуально увидеть все промежуточные результаты. В автоматическом режиме для получения результата необходимо только ввести исходные данные.

УДК 004

## 1С – ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ШИНА ДАННЫМИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ

А. И. ЯКИМОВ, А. Н. ВЕРЕМЕЕВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Современные технологии позволяют сделать оцифровку любого производства на предприятии, независимо от его специфики и отрасли, в которой организуется производственная деятельность, и получить полную и актуальную информацию о производстве в режиме реального времени.

Продукты фирмы 1С развивались в соответствии с информационной моделью Common Information Model (СІМ) [1, 2], начиная с верхнего уровня – бухгалтерии. В настоящее время представляют инновационное решение модели СІМ в системе 1С:ERP Управление предприятием.

На большинстве предприятий первый и второй уровни выглядят как разорванная цепочка, т. к. данные, несмотря на их важность, объем и значимость, с нижнего уровня вводятся пользователями вручную. Стоит задача получить эти данные естественным образом и затем в дальнейшем при их переходе наверх, они должны агрегироваться, суммироваться, консолидироваться. Для этого решения предлагается техническая база 1С в виде общей энергетической шины данных уровня управления ресурсами предприятия на основе информационных технологий с использованием стандарта OPC. OPC – это семейство программных технологий, представляющее единый интерфейс для управления объектами автоматизации и технологическими процессами, базирующихся в основном на Windows-технологиях: OLE, ActiveX, COM/DCOM.

Эффект от управленческой и оперативной информации о производственном процессе зависит от непрерывности потока данных, собираемых на нижних уровнях. Программный продукт «1С – ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ШИНА ДАННЫМИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ», реализованный на Могилевском комбинате силикатных изделий, предназначен для сбора информации в единую централизованную систему управления ресурсами и интеграционными процессами компании. В ней отображаются показатели предприятия за текущий период, выполняется сравнение с предыдущим месяцем и с предыдущим годом аналогичного периода.

В многопользовательском серверном режиме с разграничением прав и предоставляемого интерфейса и разделов пользователи системы получают свои конкретные данные за выбранный период. Можно посмотреть на базе модулей ввода-вывода используемых счетчиков подсчета продукции ритмичность производства в целом и конкретного участка.

Все строительные материалы проходят автоклавную обработку с периодичностью сутки. В системе представлены графики загрузки, выгрузки продукции в автоклавах, периодах их запарки, выдержки. На основании работающих

производственных систем в цехах предприятия производится продукция и данные о работе технологического оборудования, обрабатываемые Scada-системами, попадают из OPC-серверов в техническую базу общей шины данных. Примерами таких участков являются дозировка растворобетонными узлами (рис. 1), дозировка на технологических линиях производства ячеистого бетона и силикатного кирпича.

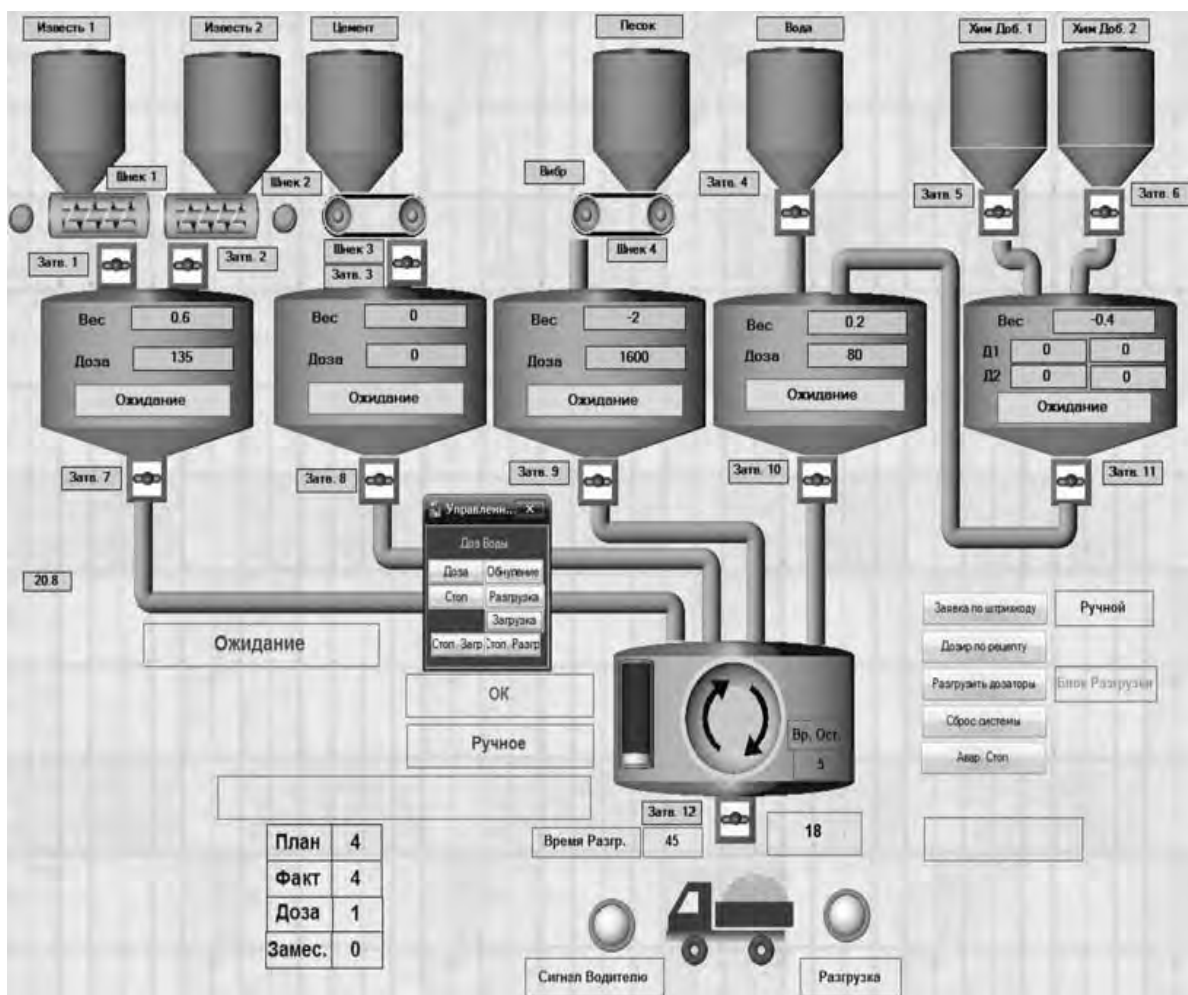


Рис. 1. Управление растворобетонными узлами 1С + Scada

Производственная информация о показателях работы оборудования хранится на сервере 1С за несколько лет в СУБД MS SQL 2019. Все системы дозирования работают в штатном режиме с набором данных, защищенным от неправильных действий пользователей.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ravikumar, G.** A Common Information Model (CIM) Oriented Graph Database Framework for Power Systems / G. Ravikumar, S.A. Khaparde // IEEE Transactions on Power Systems. – 2017. – Vol. 32, № 4. – P. 2560–2569.
2. **Богомолов, Р. А.** Создание CIM-модели в АО «СО ЕЭС» / Р. А. Богомолов // Цифровая трансформация. – 2021. – № 2 (65). – С. 24–29.

УДК 004

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОДВИЖЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ВЫПУСКАЮЩЕЙ КАФЕДРЫ УНИВЕРСИТЕТА

А. И. ЯКИМОВ, Л. А. ТИМАШКОВА, Т. Р. САРСЫМБАЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Современное образование тесно связано с развитием инноваций и стремится к постоянному улучшению образовательного процесса. Выпускающая кафедра университета играет ключевую роль в разработке и реализации инновационных проектов, направленных на подготовку квалифицированных специалистов. Автоматизация продвижения инновационных проектов является важным элементом развития выпускающей кафедры, поскольку позволяет оптимизировать процессы и достичь большей эффективности.

Продвижение – это доведение информации о товаре или услуге до потребителя. Для более успешного продвижения услуги или товара организациям следует привлекать как можно больше покупателей путем оригинальных обращений, размещения информации о продукте, убеждающей потребителей в необходимости именно этого товара [1].

Основные задачи автоматизации продвижения инновационных проектов выпускающей кафедры университета.

1. Оптимизация процесса выбора инновационных проектов. Автоматизация позволит разработать систему оценки и отбора проектов, учитывающую их значимость, актуальность и потенциал для успешной реализации.

2. Улучшение коммуникации и взаимодействия с заинтересованными сторонами. Автоматизированные инструменты обеспечат более эффективное взаимодействие с потенциальными инвесторами, партнерами и студентами, участвующими в проектах.

3. Документирование и анализ результатов. Автоматизированные системы позволят хранить и анализировать данные по реализации проектов, что обеспечит более детальное понимание эффективности инноваций и возможных улучшений.

Примеры инструментов автоматизации продвижения инновационных проектов.

1. Электронная платформа для подачи заявок на инновационные проекты и их оценки. Такая платформа может включать критерии оценки проектов, базу знаний и обратную связь для участников.

2. CRM-системы для взаимодействия с потенциальными инвесторами и партнерами, автоматизации процесса коммуникации и отслеживания статуса проектов.

3. Системы учета и анализа данных по реализации инновационных проектов, позволяющие формировать отчеты и проводить анализ эффективности [2].

На кафедре «Автоматизированные системы управления» разработан прототип информационной системы для продвижения и поддержки университетских инновационных проектов, создаваемых студентами. Проект реализован в виде веб-сайта, который предоставляет информацию о проектах, а также позволяет заказать интересующий проект.

Целью разработки информационной системы было создание удобной и доступной платформы, которая содействует продвижению университетских инновационных проектов, а также облегчает их заказ и сотрудничество с предприятиями и компаниями. За счет использования современных технологий удалось создать функциональный и интуитивно понятный веб-сайт. Клиентская часть создавалась с использованием фреймворка Nest.js. В качестве менеджера состояний использовалась библиотека Redux. Для организации HTTP-запросов использовалась библиотека Axios. Серверная часть была разработана с использованием программной платформы Node.js и фреймворка Nest.js. Для аутентификации и авторизации выбрана JWT-аутентификация, использующая JWT-токены. Для взаимодействия с базой данных использовалась ORM Prisma. Для базы данных выбрана PostgreSQL.

В разработке информационной системы значительное внимание уделено SEO-оптимизации с целью повышения видимости и поисковой выдачи веб-сайта. Были использованы соответствующие метатеги, создан файл robots.txt и разработана карта сайта для улучшения индексации и ранжирования страниц.

Разработанный проект представляет собой полнофункциональную и безопасную систему, способствующую продвижению и сотрудничеству в области университетских инноваций. Проект имеет потенциал для успешной реализации и положительного влияния на развитие инновационной сферы выпускающей кафедры.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колчина, Н. О.** Маркетинговые инструменты продвижения инноваций в системе высшего образования / Н. О. Колчина, М. Де Мартино // Интеграция образования. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 176–187.

2. **Кучерявенко, С. А.** Маркетинговые инструменты коммерциализации инновационных разработок стартапов вуза / С. А. Кучерявенко, С. Н. Прядко // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2023. – С. 89–96.

УДК 004

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА С ДЕМОСТРАЦИЕЙ РАЗРАБОТАННЫХ ИГРОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

А. И. ЯКИМОВ, С. А. ЯМЩИКОВ, С. О. ШАМΠΑНОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Актуальность разработки игровых приложений для обучения поведению в опасных ситуациях обусловлена возможностью использования современных технологий для эффективного обучения, а также потребностью повышения уровня безопасности населения. Развитие таких приложений имеет большое значение для общества и приносит новые возможности в области обучения поведению в экстремальных ситуациях.

DemoPro – компьютерная программа с демонстрацией разработанных программных приложений для обучения поведению в экстремальных ситуациях. Данная программа представляет собой одну сцену, в которой размещены стенды разработанных приложений [1].

После запуска приложения пользователь сможет подробно ознакомиться с каждым разработанным проектом самостоятельно, переключаясь с помощью стрелок «Вправо» и «Влево» между стендами. Каждый стенд оснащен демонстрацией игрового процесса и информацией о нем. Переключение между окнами игрового процесса и информацией происходит с помощью кнопки «Показать информацию», размещенной непосредственно на самом стенде.

DemoPro демонстрирует следующие игровые приложения.

Безопасный путь в школу. Цель игры: привить детям в игровой форме базовые навыки и элементарные знания, позволяющие предотвратить теплотравматизм в повседневной жизни; указать на наличие опасных факторов, связанных с эксплуатацией теплового оборудования и тепловых сетей ([https://drive.google.com/file/d/1Pf7izNDD51321L7zErTABNvc\\_ftH2bfM/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1Pf7izNDD51321L7zErTABNvc_ftH2bfM/view?usp=sharing)).

На футбол. Цель игры: привить детям в игровой форме базовые навыки и элементарные знания, позволяющие предотвратить электротравматизм в повседневной жизни; указать на наличие опасных факторов, связанных с эксплуатацией электрического оборудования и электрических сетей (<https://drive.google.com/file/d/1R1BeFPRkRuqgQ6WLBjtITHfBwVETeKYL/view?usp=sharing>).

На отдыхе. Цель игры: привить детям в игровой форме базовые навыки и элементарные знания, позволяющие предотвратить электротравматизм в повседневной жизни; указать на наличие опасных факторов, связанных с

эксплуатацией электрического оборудования и электрических сетей (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.CyberKashaCompany.ToRest>).

Безопасный дом. Мобильное игровое приложение «Безопасный дом» поможет привить детям базовые знания и навыки обращения с тепло- и электрооборудованием. Помимо этого, в приложении рассмотрены основные неполадки, с которыми может столкнуться человек в быту ([https://play.google.com/store/apps/details?id=com.Cyber\\_K.SafeHouse](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.Cyber_K.SafeHouse)).

Юный спасатель. Приложение, в котором игроку придется спасти провалившегося под лед мальчика. Однако делать это необходимо, учитывая все особенности безопасного спасения. Благодаря технологиям VR окунуться в этот процесс и лучше запомнить все нюансы будет еще проще ([https://drive.google.com/file/d/1\\_AaRVf1mrH7WZ6WII-aCQ7HgD4JZu8DQ/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1_AaRVf1mrH7WZ6WII-aCQ7HgD4JZu8DQ/view?usp=sharing)).

Безопасный дом VR. Приложение обращает внимание на базовые неполадки тепло- и электрооборудования. При помощи технологий виртуальной реальности присутствует возможность в ярких красках показать последствия, к которым ведет неправильное обращение с оборудованием (<https://drive.google.com/file/d/1Vooct3yozGC8W4YiT1QVpGnvS8R8Cb2/view?usp=sharing>).

VR на предприятии. Данное приложение находится на стадии прототипа. Оно направлено на изучение рисков, связанных с различными опасностями на предприятии. Демонстрируемая сцена показывает последствия неправильного обращения со станком для распила ([https://drive.google.com/file/d/12WE73ZJVaWQUG9KL3KQDezmfU18dN\\_33/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/12WE73ZJVaWQUG9KL3KQDezmfU18dN_33/view?usp=sharing)).

Компьютерная программа представляет собой приложение, созданное на игровом движке Unreal Engine версии 5.2 с использованием языка визуального программирования Blueprints. Файловая структура исходного проекта программы в Unreal Engine на момент составления заявки состоит из следующих папок: Blueprints, Fonts, Maps, Meshes, Movies, StarterContent и Widgets. Общий размер проекта приложения в Unreal Engine на диске – 3,56 ГБ, количество файлов – 3152. После сборки приложения для последующего запуска его размер на диске составляет 528 МБ. Технические требования для запуска приложения: Windows 8.1 или выше, DirectX 11.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Якимов, А. И.** DemoPro – компьютерная программа с демонстрацией программных приложений для обучения поведению в экстремальных ситуациях: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 1649-КП / А. И. Якимов, С. О. Шампанов, С. А. Ямщиков. – Минск: НЦИС, 2023. – Дата регистрации 04.12.2023.



УДК 004.77

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Э. И. ЯСЮКОВИЧ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Развивающиеся в XXI в. информационные технологии создают предпосылки для проектирования сложных кибер-физических систем, взаимодействующих с сетью Интернет и состоящих из элементов, которые получают данные из окружающей среды [1]. В состав кибер-физических систем входят элементы, проявляющие различные поведенческие модальности, работают в разных масштабах и взаимодействуют различными способами.

Главными элементами кибер-физической системы являются искусственный интеллект и технологии, получающие сведения от датчиков, называемых сенсорами, которые анализируют их и используются для дальнейшего управления.

Для создания эффективного использования и развития кибер-физических систем необходимо увеличить количество их процессорных устройств и средств хранения данных. Допускается также объединение кибер-физических систем, управляемых компьютерными алгоритмами, и пользователей, интегрированными с сетью Интернет. При этом эффективность использования когнитивных способностей, т. е. навыков усваивания и обработки информации об окружающем мире, таких как логическое мышление и принятие решений, является ниже компьютерных.

В настоящее время человек не в состоянии справляться с необходимыми для принятия решений объемами информации, поэтому некоторую часть его действий можно передать кибер-физической системе [2, 3]. При этом использование кибер-физических систем усиливает способности человека, в связи с чем возникает необходимость создания новых интерактивных систем, в которых человек остается в контуре управления.

Кибер-физические системы способны также повысить уровень жизни людей, поэтому в настоящее время многие крупные компании берут курс на развитие их разработки.

В работе предлагаются основные принципы проектирования информационно-аналитических процессов кибер-физических систем, в состав которых входят две компоненты: вычислительная и прикладная.

Вычислительная компонента используется для разработки прикладных элементов кибер-физической системы с ограниченными возможностями создания ее компонентов. При этом вычислительный компонент создается до разработки компоненты прикладной функциональности. Это несколько увели-

чивает проблемы надежности и эффективности создаваемой кибер-физической системы.

Прикладная компонента создается с ограниченными возможностями кибер-физической системы при создании вычислительной компоненты, что может привести к критическим проблемам с надежностью и эффективностью системы в целом.

Проектирование информационно-аналитических процессов кибер-физических систем выполняется для таких уровней, как физический, сетевой и другие. При этом физический уровень состоит из датчиков, приводов, отслеживающих устройств и вычислительных элементов, а сетевой используется для получения доступа к киберпространству по различным сетевым протоколам.

Для повышения качества проектирования кибер-физических систем необходимо увеличить прозрачность и степень повторного использования всех проектных решений до их реализации, а также глубину проработки функциональной и логической организации системы с качественным документированием. Специалисты должны осваивать и развивать соответствующие методики и инструменты работы с кибер-физическими системами, улучшать и расширять свои возможности в зависимости от ситуации, автоматически обновлять или загружать соответствующие функции и данные через стандартизированные безопасные каналы связи с промышленными платформами удаленного обслуживания.

Кибер-физические системы генерируют огромное количество данных, которым присущи такие характеристики, как объем, скорость и многообразие.

Объем в данном случае – это количество многообразных данных, измеряемое в петабайтах и терабайтах, а скорость их передачи соответствует скорости передачи данных или частоте, с которой данные генерируются в режиме реального времени. Многообразием данных являются различные форматы, в которых эти данные генерируются. Методы многообразных данных могут обеспечить их крупномасштабный анализ для мониторинга и визуализации в реальном времени, а облачные технологии предлагают хранение большого объема данных и их обработку с помощью сложных вычислительных алгоритмов в облаке с наименьшей временной задержкой.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киберфизические системы. Методы высокоуровневого проектирования / Я. Г. Горбачев [и др.]. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2022. – 48 с.
2. **Платунов, А. Е.** Создание киберфизических систем: проблемы подготовки ИТ-специалистов / А. Е. Платунов, В. Ю. Пинкевич // Control Engineering Россия. – 2021. – № 3 (93). – С. 64–70.
3. **Куприяновский, В. П.** Кибер-физические системы как основа цифровой экономики / В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот, С. А. Синыгов // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 18–25.

УДК 517.925

## ПРАВСТОРОННЯЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ МНОГОТОЧЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ ЛЯПУНОВА

А. Н. БОНДАРЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Объектом исследования является краевая задача типа [1]

$$\frac{dX}{dt} = A_1(t)XA_2(t) + P_1(t)XP_2(t) + Q_1(t)XQ_2(t) + R_1(t)XR_2(t) + XB(t) + F(t); \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k M_i X(t_i) = 0, \quad 0 = t_1 < t_2 < \dots < t_k = \omega, \quad X \in \mathbb{R}^{n \times m}, \quad (2)$$

где  $A_j(t)$ ,  $P_j(t)$ ,  $Q_j(t)$ ,  $R_j(t)$ ,  $B(t)$ ,  $F(t)$  – матрицы класса  $C[0, \omega]$  соответствующих размерностей,  $j = 1, 2$ ;  $M_i$  – заданные постоянные  $(n \times n)$ -матрицы.

В предлагаемой работе, являющейся обобщением [1], задача (1) и (2) исследуется в банаховом пространстве  $C$  непрерывных матриц-функций с нормой  $\|X\|_C = \max_{t \in [0, \omega]} \|X(t)\|$  на основе декомпозиции (расщепления) матрицы  $B(t)$  в виде  $B(t) = B_1(t) + B_2(t)$ , где матрицы  $B_1(t)$ ,  $B_2(t)$  выбираются по определенной методике, например согласно [2, гл. I]. Выбор декомпозиции зависит не только от алгебраических, но и от функциональных свойств этих матриц.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \gamma &= \|\Phi^{-1}\|, m_i = \|M_i\|, \alpha_j = \max_{t \in [0, \omega]} \|A_j(t)\|, \beta_2 = \max_{t \in [0, \omega]} \|B_2(t)\|, h = \max_{t \in [0, \omega]} \|F(t)\|, \\ p_j &= \max_{t \in [0, \omega]} \|P_j(t)\|, q_j = \max_{t \in [0, \omega]} \|Q_j(t)\|, r_j = \max_{t \in [0, \omega]} \|R_j(t)\|, \mu_1 = \max_{t \in [0, \omega]} \|V(t)\|, \mu_2 = \max_{t \in [0, \omega]} \|V^{-1}(t)\|, \\ v_i &= \|V_i\|, q = \gamma \mu_1 \mu_2 (\alpha_1 \alpha_2 + p_1 p_2 + q_1 q_2 + r_1 r_2 + \beta_2) \omega \sum_{i=1}^k m_i v_i, N = \gamma \mu_1 \mu_2 \omega h \sum_{i=1}^k m_i v_i, \end{aligned}$$

где  $\|\cdot\|$  – определённая норма матриц, например любая из норм, приведенных в [3, с. 21];  $\Phi$  – линейный матричный оператор типа [4],  $\Phi Y \equiv \sum_{i=1}^k M_i Y V_i$ ;  $V_i = V(t_i)$ ,  $V(t)$  – фундаментальная матрица уравнения

$$dV/dt = VB_1(t). \quad (3)$$

**Теорема.** Пусть оператор  $\Phi$  однозначно обратим. Тогда при выполнении условия  $q < 1$  задача (1), (2) однозначно разрешима; ее решение  $X(t)$  представимо как предел равномерно сходящейся последовательности матричных функций, определяемых рекуррентным интегральным соотношением и удовлетворяющих условию (2), при этом справедлива оценка

$$\|X\|_C \leq N/(1 - q). \quad (4)$$

С помощью методики, используемой в [1], на основе (3) получен алгоритм

$$X_p(t) = \left( \Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_i \int_{t_i}^t [A_1(\tau)X_{p-1}(\tau)A_2(\tau) + P_1(\tau)X_{p-1}(\tau)P_2(\tau) + Q_1(\tau)X_{p-1}(\tau)Q_2(\tau) + R_1(\tau)X_{p-1}(\tau)R_2(\tau) + X_{p-1}(\tau)B_2(\tau) + F(\tau)]V^{-1}(\tau)d\tau V_i \right\} \right) V(t), \quad p=1, 2, \dots, \quad (5)$$

где в качестве начального приближения принимаем произвольную матрицу  $X_0(t) \in C([0, \omega], \mathbb{R}^{n \times m})$ .

Видим, что алгоритм (5) определяет последовательность  $\{X_p(t)\}_1^\infty \subset C^1([0, \omega], \mathbb{R}^{n \times m})$ . Доказано, что все приближения, определяемые алгоритмом (5), удовлетворяют краевому условию (2).

Установлено, что последовательность  $\{X_r\}_0^\infty$  сходится равномерно по  $t \in [0, \omega]$  к решению задачи (1), (2), при этом справедлива оценка

$$\|X - X_r\|_C \leq \frac{q^r}{1-q} \|X_1 - X_0\|_C, \quad r=0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

На основе (6) имеем оценку области локализации решения  $X(t)$ , определяемую алгоритмом (5),

$$\|X\|_C \leq \|X_0\|_C + \frac{\|X_1 - X_0\|_C}{1-q}. \quad (7)$$

Очевидно, приближение  $X_0(t) \equiv 0$  существенно упрощает не только вычисление приближений по алгоритму (5), но и оценки (4), (6) и (7), при этом

$$\|X_1\|_C = \|\mathcal{L}(0)\|_C.$$

Оценка для  $\|\mathcal{L}(0)\|_C$  имеет вид

$$\begin{aligned} \|\mathcal{L}(0)\|_C &= \left\| \left( \Phi^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^k M_i \int_{t_i}^t F(\tau)V^{-1}(\tau)d\tau V_i \right\} \right) V(t) \right\| \leq \\ &\leq \left\| \Phi^{-1} \left\| \sum_{i=1}^k \|M_i\| \|V_i\| \int_0^\omega \|F(\tau)V^{-1}(\tau)\| d\tau \|V(t)\| \right\| \leq \gamma \sum_{i=1}^k m_i v_i \mu_1 \mu_2 \omega h = N. \end{aligned}$$

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондарев, А. Н.** Анализ многоточечной краевой задачи для нелинейного матричного дифференциального уравнения / А. Н. Бондарев, В. Н. Лаптинский // Дифференциальные уравнения. – 2023. – Т. 59, № 12. – С. 1591–1598.
2. **Лаптинский, В. Н.** Конструктивный анализ управляемых колебательных систем / В. Н. Лаптинский. – Минск: ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300 с.
3. **Демидович, Б. П.** Лекции по математической теории устойчивости / Б. П. Демидович. – Москва: Наука, 1967. – 472 с.
4. **Murty, K. N.** Two (multi) point nonlinear Lyapunov systems – existence and uniqueness / K. N. Murty, G. W. Howell, S. Sivasundaram // Journ. Mathem. Anal. and Appl. – 1992. – Vol. 167. – P. 505–515.

УДК 621.926

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ  
НА КИНЕМАТИКУ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

А. И. ЕЛКИН, В. В. РЯБКОВА, А. В. АБОРКИН

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых  
Владимир, Россия

















Высокоэнергетический шаровой размол проводят с использованием различного оборудования и условий (различные продолжительность процесса, соотношения массы мелющих тел к массе обрабатываемого материала, среда обработки и т. п.), которые в совокупности с составом шихты в значительной мере влияют на механику процесса. Поэтому для обеспечения повторяемости результатов необходимо использование единого параметра – величины энергонапряженности, характеризующей геометрические и режимные условия механического синтеза, а также учитывающей тип обрабатываемого материала. Численное определение величины энергонапряженности, с учетом перечисленных факторов, влияющих на механику процесса, возможно на основе математического моделирования методом дискретных элементов [1–3]. Целью работы является моделирование процесса высокоэнергетического шарового размол в планетарной мельнице и изучение влияния коэффициентов трения на характер движения мелющих тел. Для достижения поставленной цели в программном комплексе EDEM, основанном на идеологии динамического метода дискретных элементов, была разработана модель высокоэнергетического шарового размол.

Разработанная модель соответствовала условиям обработки в планетарной мельнице Активатор 2S при скорости вращения водила  $694 \text{ мин}^{-1}$  и передаточном соотношении 2 с использованием стальных шаров и рабочей камеры. Далее были проведены серии численных экспериментов с варьированием коэффициентов, характеризующих контактное взаимодействие мелющих тел. При расчетах была использована модель контактного взаимодействия Герца – Миндлина. Коэффициент статического трения и трения качения изменяли в диапазонах  $0,1 \dots 1$  и  $0,01 \dots 0,5$  соответственно. Коэффициент реституции во всех расчетах принимали  $0,75$ .

В табл. 1 приведены мгновенные изображения, характеризующие влияние коэффициентов трения на кинематику движения мелющих тел на установленном режиме обработки. Из представленных данных видно, что увеличение коэффициента трения качения в рассматриваемом диапазоне не оказывает существенного влияния на характер движения шаров. Однако ведет к снижению относительной скорости и количеству столкновений шаров, что уменьшает суммарную энергию столкновения шаров системы. Это особенно заметно для случаев с малым значением коэффициента статического трения. В то же время влияние коэффициента статического трения на характер движения и энергии столкновения шаров системы более существенно. Так, например, заметно, что при росте коэффициента статического трения изменяется характер движения

шаров. При этом снижается доля «малоподвижных» шаров, что ведет к увеличению энергии столкновения шаров системы. Кроме того, значительно увеличивается средняя сила столкновения мелющих тел. Интересным является то, что наличие в рабочей камере обрабатываемого материала (например, алюминиевого сплава), за счет эффекта самофутировки шаров микрочастицами алюминия, по всей видимости, должно повышать коэффициент статического трения, оказывая благоприятное влияние на эффективность обработки. В то же время наличие обрабатываемого материала между сталкивающимися телами делает столкновения шариков менее упругими. Поэтому данный вопрос требует дополнительного исследования.

Табл. 1. Результаты моделирования положения мелющих тел

Коэффициент трения качения	Коэффициент статического трения			
	0	0,2	0,5	1
0				
0,02				
0,1				
0,5				

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00889, <https://rscf.ru/project/23-29-00889/>.*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Burmeister, C. F.** Process engineering with planetary ball mills / C. F. Burmeister, A. Kwade // Chem Soc Rev. – 2013. – № 42 (18). – P. 7660–7667.
2. **Rosenkranz, S.** Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills / S. Rosenkranz, S. Breitung-Faes, A. Kwade // Powder Technology. – 2011. – № 212. – P. 224–230.
3. Моделирование энергосиловых параметров обработки в планетарной мельнице и оценка их влияния на размер частиц композиционного порошка сплава АМг2/графит / В. Г. Гусев [и др.] // Металлы. – 2019. – № 1. – С. 27–34.

УДК 517.977.57

## СУЩЕСТВОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИРИХЛЕ ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

В. Г. ЗАМУРАЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В [1, 2] рассматривалась задача оптимального управления, в которой управляемый процесс описывается линейным функциональным уравнением в гильбертовом пространстве, а управляющим воздействием является изменение пространства. Были установлены достаточные условия разрешимости этой задачи, а результаты применены к задаче оптимизации, в которой управляемый процесс описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка.

Рассматривается применение результатов указанных работ к исследованию разрешимости задачи минимизации функционала  $j(c) = \|u_0(c) - u_d\|_{L_2(\Omega)}$  на множестве управлений

$$C = \left\{ c \in C[0,1] \left| 0 < \alpha \leq c(y) \leq \beta < 1, |c'(y)| \leq k_1, \int_0^1 c(y) dy = k_2 \right. \right\},$$

где  $\Omega = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 < x < 1, 0 < y < 1\}$ ;  $u_d$  – заданная функция из  $L_2(\Omega)$ ;  $u_0(c)$  – обобщённое решение внутренней задачи Дирихле для эллиптического уравнения с однородным краевым условием [3] в области

$$\Omega(c) = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 < x < c(y), 0 < y < 1\}.$$

Доказывается, что рассматриваемая задача имеет решение.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Замураев, В. Г.** О достаточных условиях существования оптимальных пространств для линейных функциональных уравнений / В. Г. Замураев // Актуальные проблемы науки и техники: материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Сарапул, 20–22 мая 2021 г. – Ижевск: ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2021. – С. 45–49.
2. **Замураев, В. Г.** О проверке непрерывности изнутри многозначных отображений / В. Г. Замураев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 397–398.
3. **Михлин, С. Г.** Курс математической физики / С. Г. Михлин. – Москва: Наука, 1968. – 575 с.

УДК 517.925

К ЗАДАЧЕ ВАЛЛЕ-ПУССЕНА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО МАТРИЧНОГО  
УРАВНЕНИЯ ЛЯПУНОВА ВТОРОГО ПОРЯДКА

А. И. КАШПАР

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Исследуется обобщение задачи [1–3]

$$d^2 X/dt^2 = A(t)dX/dt + dX/dt B(t) + C_1(t)XC_2(t) + D_1(t)XD_2(t) + F(t, X, dX/dt); \quad (1)$$

$$X(0) = M, \quad X(\omega) = N, \quad (2)$$

где  $A, B, C_i, D_i \in \mathbb{C}(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $F \in \mathbb{C}(D, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $D = \{(t, X, Y) : t \in I, \|X\| < \tilde{\rho}_1, \|Y\| < \tilde{\rho}_2\}$  ( $Y = dX/dt$ ),  $i = 1, 2$ ;  $M, N$  – заданные вещественные матрицы. Предполагается также, что нелинейная функция  $F(t, X, Y)$  удовлетворяет относительно  $X, Y$  в области  $D$  условию Липшица (локально);  $0 < \tilde{\rho}_i \leq \infty$ ,  $I = [0, \omega]$ .

В конечномерной банаховой алгебре  $\mathcal{B}(n)$  непрерывных матриц-функций с нормой  $\|X\|_c = \max_{t \in I} \|X(t)\|$  ( $\|\cdot\|$  – норма матриц в рамках определения этой алгебры) с помощью метода регуляризации [4] получены достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1), (2), представленные в ее терминах. Разработан итерационный алгоритм классического типа.

Рассматривается эквивалентная (1), (2) задача

$$dX/dt = Y, \quad dY/dt = A(t)Y + YB(t) + C_1(t)XC_2(t) + D_1(t)XD_2(t) + F(t, X, Y); \quad (3)$$

$$X(0) = M, \quad X(\omega) = N. \quad (4)$$

Вводятся следующие обозначения:

$$h_1 = \max_{t \in I} \|M + P_{UV}(t) + \mathcal{L}_1(0, 0)\|, \quad h_2 = \max_{t \in I} \|Q_{UV}(t) + \mathcal{L}_2(0, 0)\|, \quad h = \max_{t \in I} \|F(t, 0, 0)\|;$$

$$c_i = \max_{t \in I} \|C_i(t)\|, \quad d_i = \max_{t \in I} \|D_i(t)\|, \quad \lambda_U = \max_{0 \leq s \leq \tau \leq \omega} \|U(\tau)U^{-1}(s)\|, \quad \lambda_V = \max_{0 \leq s \leq \tau \leq \omega} \|V(s)V^{-1}(\tau)\|;$$

$$G = \{(t, X, Y) : t \in [0, \omega], \|X\| \leq \rho_1, \|Y\| \leq \rho_2\}; \quad \tilde{G} = \{(X(t), Y(t)) : \|X\|_c \leq \rho_1, \|Y\|_c \leq \rho_2\};$$

$$p_1 = \frac{1}{3} \gamma \lambda_U^2 \lambda_V^2 \omega^3 (c_1 c_2 + d_1 d_2 + L_1), \quad p_2 = \frac{1}{2} \gamma \lambda_U^2 \lambda_V^2 \omega^2 (c_1 c_2 + d_1 d_2 + L_1), \quad q_1 = \frac{1}{3} \gamma \lambda_U^2 \lambda_V^2 \omega^3 L_2;$$

$$q_2 = \frac{1}{2} \gamma \lambda_U^2 \lambda_V^2 \omega^2 L_2; \quad \gamma = \|\Phi^{-1}\|; \quad Z = \begin{pmatrix} \|X\|_c \\ \|Y\|_c \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} p_1 & q_1 \\ p_2 & q_2 \end{pmatrix}; \quad H = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix};$$

$$K_U(\tau, s) = U(\tau)U^{-1}(s); \quad K_V(s, \tau) = V(s)V^{-1}(\tau),$$

где  $0 < \rho_i < \tilde{\rho}_i$ ,  $i = 1, 2$ ;  $U(t)$ ,  $V(t)$  – интегральные матрицы уравнений  $dU/dt = A(t)U$  ( $U(0) = E$ ),  $dV/dt = VB(t)$  ( $V(0) = E$ ),  $E$  – единичная матрица;

$$P_{UV}(t) = \int_0^t U(\tau)(\Phi^{-1}(N - M))V(\tau)d\tau; \quad Q_{UV}(t) = U(t)(\Phi^{-1}(N - M))V(t);$$



$\Phi$  – линейный оператор,  $\Phi Z(t) = \int_0^\omega U(\tau)Z(t)V(\tau)d\tau$ ,  $Z(t) = U^{-1}(t)Y(t)V^{-1}(t)$ ;  $L_i = L_i(\rho_1, \rho_2)$  ( $i=1,2$ ) – постоянные Липшица для  $F(t, X, Y)$  в области  $G$ ;  $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2$  – интегральные операторы:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_1(X, Y) &= \int_0^t U(\varphi)\Phi^{-1} \left( \int_0^\omega \left( \int_\tau^\varphi K_U(\tau, s)(C_1(s)X(s)C_2(s) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + D_1(s)X(s)D_2(s) + F(s, X(s), Y(s)))K_V(s, \tau)ds \right) d\tau \right) V(\varphi)d\varphi, \\ \mathcal{L}_2(X, Y) &= U(t)\Phi^{-1} \left( \int_0^\omega \left( \int_\tau^t K_U(\tau, s)(C_1(s)X(s)C_2(s) + D_1(s)X(s)D_2(s) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + F(s, X(s), Y(s)))K_V(s, \tau)ds \right) d\tau \right) V(t). \end{aligned}$$

**Теорема.** Пусть оператор  $\Phi$  однозначно обратим и выполнены условия  $p_1\rho_1 + q_1\rho_2 + h_1 \leq \rho_1$ ,  $p_2\rho_1 + q_2\rho_2 + h_2 \leq \rho_2$ ,  $p_1 + q_2 < 1$ . Тогда задача (3), (4) однозначно разрешима в области  $G$ , при этом справедлива оценка  $Z \leq (E - P)^{-1}H$ .

Для построения решения задачи (3), (4) используется классический метод последовательных приближений (см., например, [5, с. 606]):

$$X_m(t) = M + P_{UV}(t) + \mathcal{L}_1(X_{m-1}, Y_{m-1}), Y_m(t) = Q_{UV}(t) + \mathcal{L}_2(X_{m-1}, Y_{m-1}), m = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

где в качестве начального приближения  $(X_0(t), Y_0(t))$  принимаются произвольные матрицы-функции класса  $\mathcal{C}(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ , принадлежащие множеству  $\tilde{G}$ . Все приближения удовлетворяют условиям (2).

Изучены вопросы сходимости, скорости сходимости последовательности  $\{X_m(t), Y_m(t)\}_0^\infty$ , построенной по алгоритму (5), при этом получены оценки  $\tilde{Z}_m \leq (E - P)^{-1}P^m Z_0$ ,  $Z \leq \tilde{Z}_0 + (E - P)^{-1}Z_0$ , где  $\tilde{Z}_0 = colon(\|X_0\|, \|Y_0\|)$ ,  $\tilde{Z}_m = colon(\|X - X_m\|_C, \|Y - Y_m\|_C)$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кашпар, А. И.** Разрешимость и построение решения краевой задачи Валле – Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка / А. И. Кашпар, В. Н. Лаптинский // Дифференциальные уравнения. – 2020. – Т. 56, № 5. – С. 570–583.

2. **Кашпар, А. И.** Регуляризация задачи Валле – Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка / А. И. Кашпар // Теория управления и математическое моделирование: материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Н. В. Азбелева и проф. Е. Л. Тонкова. – Ижевск: УИР ИжГТУ им/ М. Т. Калашникова, 2022. – С. 64–67.

3. **Кашпар, А. И.** К разрешимости и построению решения задачи Валле – Пуссена для нелинейного матричного уравнения Ляпунова второго порядка / А. И. Кашпар // Еругинские чтения – 2023: тез. докл. XXI Междунар. науч. конф. по дифференциальным уравнениям, Могилев, 23–27 мая 2023 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 76–78.

4. **Лаптинский, В. Н.** Конструктивный анализ управляемых колебательных систем / В. Н. Лаптинский. – Минск: ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300 с.

5. **Канторович, Л. В.** Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – Москва: Наука, 1977. – 744 с.

УДК 681.5.073

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

С. И. КЛЕВЦОВ

Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия

Одной из наиболее важных задач совершенствования математических и алгоритмических методов обработки результатов измерений в микропроцессорных датчиках давления является повышение точности определения измеряемых величин. Погрешность измерений в микропроцессорном датчике давления сильно зависит от влияния внешних и внутренних факторов, таких как нелинейность, температура, дрейф нуля и др. Для управления погрешностью обработки данных в микропроцессорных датчиках предлагается использовать модель пространственной мультисегментной характеристики преобразования [1]. В основе модели лежит система локальных линейных или нелинейных пространственных элементов (рис. 1).

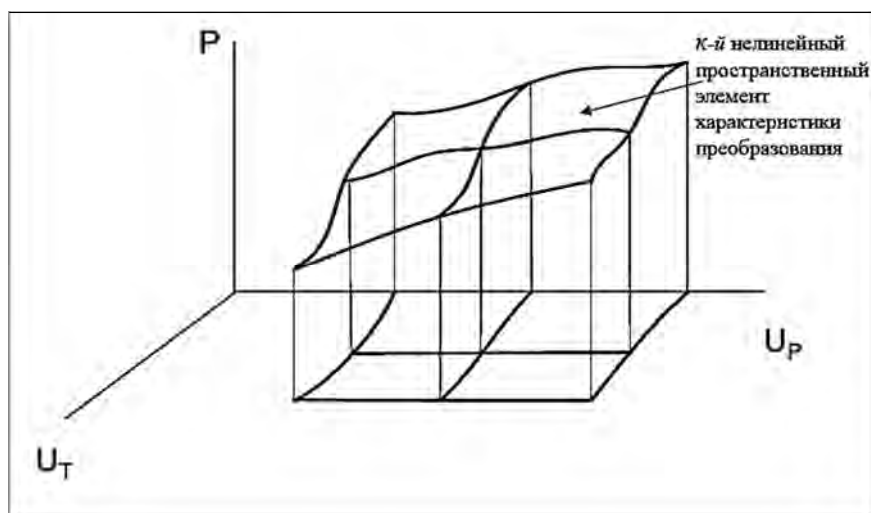


Рис. 1. Модель пространственной мультисегментной характеристики преобразования

Эти элементы можно назвать сегментами. Функция преобразования первичного измерительного преобразователя, полученная экспериментальным способом, не является идеальной для проведения измерений. Она обычно характеризуется нелинейностью, дрейфом нуля, зависит от влияния внешних факторов. Основная задача системы пространственных элементов заключается в учете влияния этих внешних и внутренних факторов в процессе определения измеряемой физической величины. Формируемая с помощью системы пространственных элементов характеристика преобразования максимально точно повторяет пространственную форму функции преобразования первичного измерительного преобразователя. Каждый сегмент может определяться своей

функцией. Функции могут различаться по типу. Часть сегментов может описываться линейными выражениями, а часть – нелинейными (полиномом).

На границах областей определения сегменты частично перекрываются, а не сшиваются. Пространственная конфигурация краев сегментов в зонах перекрытия должна обеспечивать достижение заданной погрешности аппроксимации характеристики преобразования при выборе любого из сегментов в процессе проведения измерений. Такой подход позволяет использовать при измерении в граничных точках любой из соседних сегментов. Предложенная модель обеспечивает высокую точность аппроксимации реальной характеристики преобразования датчика (рис. 2).

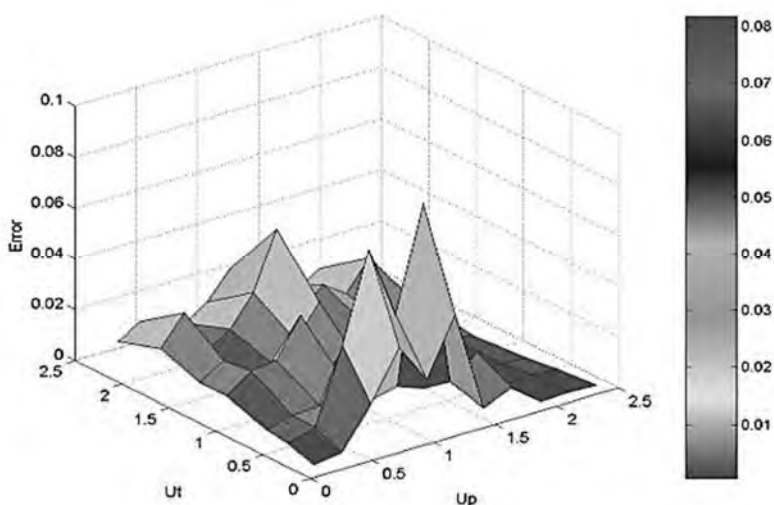


Рис. 2. Точность аппроксимации реальной характеристики преобразования датчика

Модель предназначена для управления погрешностью измерения физической переменной. Модель компенсирует влияние внешних факторов и недостатков реальной характеристики преобразования. Приведенная относительная погрешность измерения значений давления при использовании нелинейных пространственных элементов может составлять величину 0,03 %...0,16 % во всем диапазоне измерения физической переменной и заданном диапазоне температур. Не учитывается погрешность первичного измерительного преобразователя датчика. Управление погрешностью может выполняться с помощью выбора типа, оптимизации размеров и схем размещения сегментов до достижения заданной точности измерений. Модель минимизирует объем экспериментальных данных, необходимых для построения характеристики преобразования датчика.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов, С. И. Особенности выбора модели характеристики преобразования для интеллектуального датчика физических величин / С. И. Клевцов // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 61–73.

УДК 517.5

## О СТРУКТУРЕ УПРАВЛЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ

В. Н. ЛАПТИНСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Рассматривается задача управления (см., например, [1, с. 36])

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x + Q(t)u; \quad (1)$$

$$x(0) = x_0, \quad x(T) = x_1,$$

где  $A \in \mathbb{C}(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $Q \in \mathbb{C}(I, \mathbb{R}^{n \times m})$ ,  $I = [0, T]$ ,  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^m$ ,  $T > 0$ .

На основе применения методики [2] получены конструктивные достаточные условия управляемости системы (1) и построены в явном виде соответствующие управления и функции состояний.

Обозначения:

$$R(t) = X^{-1}(t)Q(t); \quad F(t) = R(t)R^T(t); \quad \tilde{F}(t) = \int_0^t F(\tau)d\tau;$$

$$\varphi = X^{-1}(T)x_1 - x_0; \quad \gamma = \|\tilde{F}^{-1}(T)\|; \quad \delta = 1 / \left( \gamma \int_0^T \|F(\tau)\|d\tau \right),$$

где  $X(t)$  ( $X(0) = E = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$ ) – фундаментальная матрица линейной системы

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x;$$

$\|\cdot\|$  – согласованная норма матрицы, для которой  $\|E\| = 1$ ;  $(\cdot)^T$  – символ транспонирования матриц.

Далее вводится множество матриц вида

$$P(t) = E + Z(t), \quad (2)$$

где  $Z \in \mathbb{C}(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $\max_{t \in I} \|Z(t)\| < \delta$ .

**Теорема 1.** Пусть система (1) управляема на отрезке  $[0, T]$ . Тогда для всякой матрицы  $P(t)$  вида (2) справедливо соотношение

$$\det \int_0^T F(\tau)P(\tau)d\tau \neq 0, \quad (3)$$

при этом управление  $u = u(t)$  и соответствующая функция состояний имеют вид

$$u(t) = R^T(t)P(t) \left( \int_0^T F(\tau)P(\tau)d\tau \right)^{-1} \varphi; \quad (4)$$

$$x(t) = X(t) \left[ x_0 + \int_0^t F(\tau) P(\tau) d\tau \left( \int_0^T F(\tau) P(\tau) d\tau \right)^{-1} \Phi \right]. \quad (5)$$

**Теорема 2.** Пусть для некоторой матрицы  $P(t)$  выполняется соотношение (3). Тогда система (1) управляема, при этом имеют место формулы (4), (5).

Для иллюстрации применения приведенных результатов рассмотрена задача управления [3, с. 183], описываемая скалярным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = ax + u. \quad (6)$$

Применительно к (6) имеем  $A = a$ ,  $Q = 1$ . Тогда  $X(t) = e^{at}$ ,  $R(t) = e^{-at}$ ,  $F(t) = e^{-2at}$ . Одно из возможных управлений при  $Z(t) \equiv 0$  имеет вид [3]

$$u(t) = \frac{2a\Phi}{1 - e^{-2aT}} e^{-at}.$$

В случае  $P = e^{2at}$  из (4) следует управление  $u(t) = \frac{\Phi}{T} e^{at}$ .

Круг возможных управлений типа (4) может быть расширен с помощью методики, используемой в [2]. Согласно [2] решение уравнения первого рода

$$\int_0^T R(\tau) u(\tau) d\tau = \Phi \quad (7)$$

отыскивается в виде

$$u(t) = R^T c + y(t), \quad (8)$$

где  $c$  – постоянный искомый вектор;  $y = y(t)$  – произвольная функция. После подстановки (8) в (7) и соответствующих вычислений получено управление

$$u(t) = y(t) - R^T(t) \tilde{F}^{-1}(T) \int_0^T R(\tau) y(\tau) d\tau + R^T(t) \tilde{F}^{-1}(T) \Phi.$$

Произвол функции  $y(t)$  может быть использован при решении задач оптимизации. Методы решения таких задач сравнительно хорошо разработаны в [4] (см. также библиографию в [5]).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубов, В. И.** Лекции по теории управления / В. И. Зубов. – Москва: Наука, 1975. – 496 с.
2. **Лаптинский, В. Н.** К теории интегральных задач / В. Н. Лаптинский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 429–430.
3. **Ройтенберг, Я. Н.** Автоматическое управление / Я. Н. Ройтенберг. – Москва: Наука, 1978. – 552 с.
4. **Моисеев, Н. Н.** Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – Москва: Наука, 1971. – 424 с.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – Москва: Наука, 1987. – 712 с.

УДК 004.42 + 004.94 + 621.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ В MAPLE

Т. С. ЛАРЬКИНА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В качестве объекта исследования рассмотрен двигатель 4A90L4У3 мощностью 2,2 кВт.

Единицы напряжения, мощности, импеданса и адмиттанса, силы тока могут быть применены в ходе реализации применения методов расчета в системе относительных единиц.

В относительных единицах математическая модель асинхронного электродвигателя может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_s}{dt} &= 1 - \frac{r_s}{\sigma x_s} \psi_s + (1 - \sigma) \frac{r_s}{\sigma x_m} \psi_r - j\psi_s; \\
 \frac{d\psi_r}{dt} &= -\frac{r_r}{\sigma x_r} \psi_r + (1 - \sigma) \frac{r_r}{\sigma x_m} \psi_s - j(1 - \omega)\psi_r; \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left( \frac{1 - \sigma}{x_m} \operatorname{Re}(j \cdot \cos(\psi_s) \cdot \psi_r) - \left( \frac{\eta_H \cdot \cos \varphi_H}{1 - s_H} \right) M_c \right); \\
 i_s &= \frac{\psi_s}{\sigma x_s} - (1 - \sigma) \frac{\psi_r}{\sigma x_m}; \quad i_r = \frac{\psi_r}{\sigma x_r} - (1 - \sigma) \frac{\psi_s}{\sigma x_m}; \\
 M &= \left( \frac{1 - s_H}{\eta_H \cdot \cos \varphi_H} \right) \frac{1 - \sigma}{x_m} \frac{1}{\sigma} \operatorname{Re}(j \cdot \cos(\psi_s) \cdot \psi_r), \quad (1)
 \end{aligned}$$

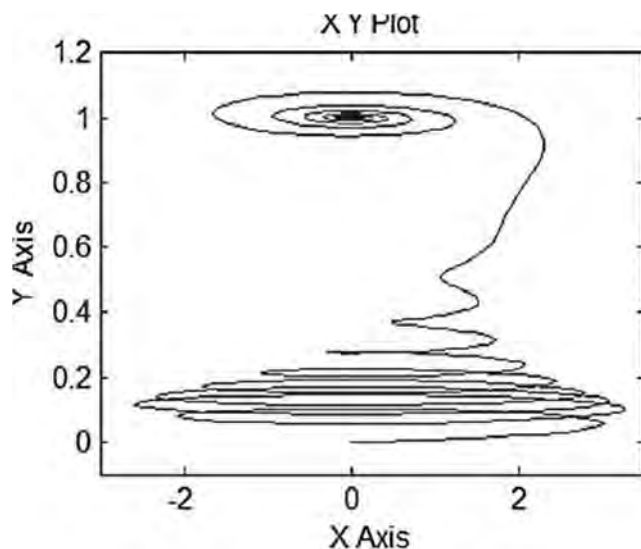
где  $r_s, r_r$  – величины активных сопротивлений фаз статора и ротора соответственно;  $i_s, i_r$  – величины векторов токов обмоток статора и ротора соответственно;  $\omega$  – величина частоты вращения ротора;  $M_c, M$  – момент со стороны рабочей машины и электромагнитный момент электродвигателя (в долях от номинального момента);  $J$  – величина момента инерции ротора электродвигателя;  $x_s, x_r$  – величины полных индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора соответственно;  $x_m$  – величина главного индуктивного сопротивления электродвигателя;  $r, m$  – число пар и количество фаз и полюсов электродвигателя;  $\psi_s, \psi_r$  – величины векторов потокосцеплений обмоток статора и ротора соответственно;  $\sigma$  – величина коэффициента рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{x^2 m}{x_s x_r};$$

$\eta_n$ ,  $\cos(\varphi_n)$ ,  $s_n$  – величины номинального значения КПД, коэффициента мощности и скольжения электродвигателя соответственно;  $\cos(\psi_s)$  – величина вектора потокосцепления, который комплексно сопряжен с вектором  $\psi_s$ .

На рис. 1 приведены фазовые траектории зависимостей момента от скорости и потокосцеплений соответственно.

a)



b)

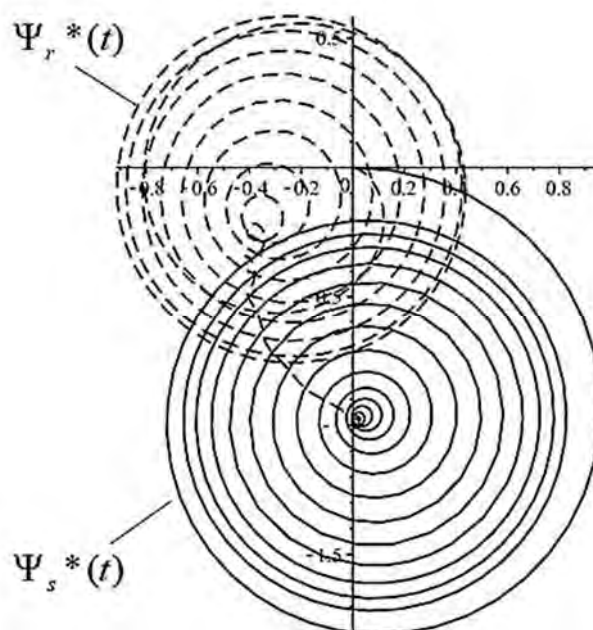


Рис. 1. Фазовые траектории зависимостей момента от скорости (a) и потокосцеплений (б)

В данном случае асинхронный электродвигатель питается от источника номинального напряжения с частотой в синхронно вращающемся поле  $\omega_1$ .

УДК 517.927.4

К АНАЛИЗУ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ  
ДЛЯ ОБОБЩЕНИЯ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ РИККАТИ

О. А. МАКОВЕЦКАЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Исследуется задача

$$\frac{dX}{dt} = A(t)X + C_1(t)XC_2(t) + XB(t) + Q_1(t)X^2 +$$

$$+ XQ_2(t)X + X^2Q_3(t) + F(t, X) \equiv G(t, X); \quad (1)$$

$$X(0) = X(\omega), \quad (2)$$

где  $(t, X) \in I \times \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $A, B, Q, C_1, C_2, Q_i \in C(I, \mathbb{R}^{n \times n})$  ( $i=1,2,3$ ),  $F \in C(D_{\tilde{\rho}}, \mathbb{R}^{n \times n})$ , матрица-функция  $F(t, X)$  в области  $D_{\tilde{\rho}} = \{(t, X) : t \in I, \|X\| < \tilde{\rho}\}$  удовлетворяет относительно  $X$  локальному условию Липшица;  $F(t, 0) \neq 0$ ;  $I = [0, \omega]$ ,  $\omega > 0$ ,  $0 < \tilde{\rho} \leq \infty$ .

В конечномерной банаховой алгебре  $\mathcal{B}(n)$  непрерывных матричнозначных функций с нормой  $\|X\|_C = \max_t \|X(t)\|$  по методу регуляризации получены эффективно проверяемые достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1), (2). Разработан алгоритм классического типа построения решения.

Обозначения:

$$D_{\rho} = \{(t, X) : t \in I, \|X\| \leq \rho\}, D = \{X(t) : \|X\|_C \leq \rho\}, \tilde{B}(\omega) = \int_0^{\omega} B(\tau) d\tau,$$

$$\tilde{\gamma} = \|\tilde{B}^{-1}(\omega)\|, \alpha = \max_t \|A(t)\|, \beta = \max_t \|B(t)\|, \delta_i = \max_t \|Q_i(t)\|, i = 1, 2, 3,$$

$$h = \max_t \|F(t, 0)\|, \sigma_j = \max_t \|C_j(t)\|, j = 1, 2,$$

$$\varphi(\rho) = \tilde{\gamma}\delta\omega \left(1 + \frac{1}{2}\beta\omega\right) \rho^2 + \tilde{\gamma}\omega \left[\alpha + \sigma_1\sigma_2 + L + \frac{1}{2}\beta\omega(\alpha + \sigma_1\sigma_2 + \beta + L)\right] \rho +$$

$$+ \tilde{\gamma}\omega h \left(1 + \frac{1}{2}\beta\omega\right),$$

$$q(\rho) = \tilde{\gamma}\delta\omega(\beta\omega + 2)\rho + \frac{1}{2}\tilde{\gamma}\beta\omega^2(\alpha + \sigma_1\sigma_2 + \beta + L) + \tilde{\gamma}\omega(\alpha + \sigma_1\sigma_2 + L),$$

где  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ ,  $0 < \rho < \tilde{\rho}$ ,  $t \in I$ ,  $L = L(\rho) > 0$  – постоянная Липшица для  $F(t, X)$  в области  $D_{\rho}$ ;  $\|\cdot\|$  – определенная норма матриц в  $\mathcal{B}(n)$ .

С помощью регуляризатора



$$\int_0^{\omega} X(\tau)B(\tau)d\tau = X(t)\tilde{B}(\omega) - \int_0^t (dX(\tau)) \left( \int_0^{\tau} B(\sigma)d\sigma \right) + \int_t^{\omega} (dX(\tau)) \left( \int_{\tau}^{\omega} B(\sigma)d\sigma \right)$$

установлено, что при выполнении условия

$$\det \tilde{B}(\omega) \neq 0 \quad (3)$$

задача (1), (2) эквивалентна матричному интегральному уравнению

$$X(t) = \left\{ \int_0^t G(\tau, X(\tau)) \left( \int_0^{\tau} B(\sigma)d\sigma \right) d\tau - \int_t^{\omega} G(\tau, X(\tau)) \left( \int_{\tau}^{\omega} B(\sigma)d\sigma \right) d\tau - \int_0^{\omega} [G(\tau, X(\tau)) - X(\tau)B(\tau)] d\tau \right\} \tilde{B}^{-1}(\omega). \quad (4)$$

На основе принципа сжимающих отображений Каччопполи – Банаха доказано, что при выполнении условия (3) и неравенств

$$\begin{aligned} \varphi(\rho) &\leq \rho, \\ q(\rho) &< 1 \end{aligned}$$

задача (1), (2) однозначно разрешима в области  $D_{\rho}$ , при этом справедлива оценка  $\|X\|_C \leq \varphi(\rho)$ .

Для построения решения интегрального уравнения (4) используется классический метод последовательных приближений:

$$\begin{aligned} X_{k+1}(t) = & \int_0^{\omega} G(\tau, X_k(\tau)) K(t, \tau) d\tau - \int_0^{\omega} [A(\tau) X_k(\tau) + C_1(\tau) X_k(\tau) C_2(\tau) + \\ & + Q_1(\tau) X_k^2(\tau) + X_k(\tau) Q_2(\tau) X_k(\tau) + X_k^2(\tau) Q_3(\tau) + \\ & + F(\tau, X_k(\tau))] d\tau \tilde{B}^{-1}(\omega), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $X_0(t) \equiv 0$ ,

$$K(t, \tau) = \begin{cases} \int_0^{\tau} B(\sigma) d\sigma \tilde{B}^{-1}(\omega), & 0 \leq \tau \leq t \leq \omega, \\ -\int_{\tau}^{\omega} B(\sigma) d\sigma \tilde{B}^{-1}(\omega), & 0 \leq t < \tau \leq \omega. \end{cases}$$

Изучены вопросы сходимости, скорости сходимости алгоритма (5), при этом получены оценки

$$\begin{aligned} \|X - X_k\|_C &\leq \frac{q^k}{1-q} \|X_1\|_C, \quad k = 1, 2, \dots, \\ \|X\|_C &\leq \frac{\|X_1\|_C}{1-q}. \end{aligned}$$

УДК 517.927.4

ОБ ОДНОМ ОБОБЩЕНИИ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ  
ДЛЯ МАТРИЧНОГО УРАВНЕНИЯ ЛЯПУНОВА

И. И. МАКОВЕЦКИЙ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Исследуется обобщение краевой задачи [1]

$$\frac{dX}{dt} = A(t)X + XB(t) + C_1(t)XC_2(t) + D_1(t)XD_2(t) + S_1(t)XS_2(t) + F(t, X), \quad X \in \mathbb{R}^{n \times n}; \quad (1)$$

$$MX(0) + NX(\omega) = 0, \quad (2)$$

где  $A, B, C_i, D_i, S_i$  ( $i = 1, 2$ )  $\in C(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $F \in C(D_{\tilde{\rho}}, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $M, N$  – вещественные  $(n \times n)$ -матрицы,  $I = [0, \omega]$ ,  $D_{\tilde{\rho}} = \{(t, X) : t \in I, \|X\| < \tilde{\rho}\}$ ,  $0 < \tilde{\rho} \leq \infty$ ; нелинейная функция  $F(t, X)$  удовлетворяет в  $D_{\tilde{\rho}}$  относительно  $X$  условию Липшица (локально);  $F(t, 0) \neq 0$ .

Эта задача изучается в конечномерной банаховой алгебре  $\mathcal{B}(n)$  непрерывных матричнозначных функций с нормой  $\|X\|_C = \max_t \|X(t)\|$ , где  $\|\cdot\|$  – определенная норма матриц в этой алгебре.

Предлагаемая работа является развитием и обобщением [1]. С помощью метода регуляризации получены достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1), (2), представленные в ее терминах, а также разработан алгоритм построения решения и дана оценка его области локализации.

Приняты обозначения:

$$D_{\rho} = \{(t, X) : t \in I, \|X\| \leq \rho\}; \quad \lambda_1 = \max_t \|U(t)\|; \quad \lambda_2 = \max_t \|U^{-1}(t)\|; \quad \mu_1 = \max_t \|V(t)\|;$$

$$\mu_2 = \max_t \|V^{-1}(t)\|; \quad c_i = \max_t \|C_i(t)\|, \quad d_i = \max_t \|D_i(t)\|, \quad s_i = \max_t \|S_i(t)\| \quad (i = 1, 2);$$

$$P = U^{-1}(\omega)N^{-1}M, \quad Q = -V(\omega), \quad \gamma = \|\Phi^{-1}\|, \quad m = \max\{\|P\|, \|Q\|\}, \quad h = \max_t \|F(t, 0)\|,$$

$$G(t, X(t)) = C_1(t)X(t)C_2(t) + D_1(t)X(t)D_2(t) + S_1(t)X(t)S_2(t) + F(t, X(t));$$

$$q = \gamma\lambda_0\mu_0m\omega(c_1c_2 + d_1d_2 + s_1s_2 + L); \quad p = \gamma\lambda_0\mu_0mh,$$

где  $t \in I$ ;  $0 < \rho < \tilde{\rho}$ ;  $\lambda_0 = \lambda_1\lambda_2$ ;  $\mu_0 = \mu_1\mu_2$ ;  $\Phi$  – линейный матричный оператор;  $\Phi X = PX - XQ$ ;  $L = L(\rho) > 0$  – постоянная Липшица для  $F(t, X)$  в  $D_{\rho}$ ;  $U(t), V(t)$  – решения соответственно уравнений  $dU/dt = A(t)U$ ,  $dV/dt = VB(t)$ .

Доказано, что в случае, когда

1)  $\det N \neq 0$ ;2) матрицы  $P, Q$  не имеют общих характеристических чисел, задача (1), (2)

эквивалентна интегральной задаче

$$X(t) = U(t) \left\{ \Phi^{-1} \left[ P \int_0^t U^{-1}(\tau) G(\tau, X(\tau)) V^{-1}(\tau) d\tau + \int_t^{\infty} U^{-1}(\tau) G(\tau, X(\tau)) V^{-1}(\tau) Q d\tau \right] \right\} V(t). \quad (3)$$

С помощью принципа сжимающих отображений Каччопполи – Банаха получена следующая теорема.

**Теорема.** Пусть выполнены условия 1), 2), а также неравенства

3)  $q < 1$ ;

4)  $p / (1 - q) \leq \rho$ .

Тогда решение задачи (1), (2) существует и единственно в области  $D_\rho$ .

Это решение представимо как предел равномерно сходящейся последовательности матричных функций, определяемых рекуррентным интегральным соотношением и удовлетворяющих условию (2), при этом справедлива оценка  $\|X\|_C \leq p / (1 - q)$ .

Решение интегрального уравнения (3) строится классическим методом:

$$X_{k+1}(t) = U(t) \left\{ \Phi^{-1} \left[ P \int_0^t U^{-1}(\tau) G(\tau, X_k(\tau)) V^{-1}(\tau) d\tau + \int_t^{\infty} U^{-1}(\tau) G(\tau, X_k(\tau)) V^{-1}(\tau) Q d\tau \right] \right\} V(t), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где  $X_0(t)$  – произвольная матрица класса  $C(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ , принадлежащая шару  $\|X\|_C \leq \rho$ . Для приближений справедливы оценки  $\|X_i\|_C \leq \rho$  ( $i = 1, 2, \dots$ ). Это нетрудно установить индукцией по  $k$  и на основании условия 4).

Изучены вопросы сходимости, скорости сходимости алгоритма (4), при этом получена оценка

$$\|X_k - X\|_C \leq q^k \frac{\|X_1 - X_0\|_C}{1 - q}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

**Замечание.** В [2] краевая задача (1), (2) качественными методами изучается в области  $I \times \mathbb{R}^{n \times n}$ . Теорема, приведенная в предлагаемой работе, очевидно, эффективнее соответствующей теоремы из [2], поскольку получена для области более общей конфигурации.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаптинский, В. Н. Матричные дифференциальные уравнения Ляпунова и Риккати / В. Н. Лаптинский, И. И. Маковецкий, В. В. Пугин. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 167 с.
2. Murty, K. N. Two (multi) point nonlinear Lyapunov systems existence and uniqueness / K. N. Murty, G. W. Howell, S. Sivasundaram // Journal of mathematical analysis and applications. – 1992. – 167. – P. 505–515.

УДК 621.315

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАНИЙ В БАЛАНСНОЙ СХЕМЕ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СРЕДЕ С РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

С. О. ПАРАШКОВ, Е. В. ТИМОЩЕНКО, В. А. ЮРЕВИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Известно, что структурные элементы (квантовые точки (КТ)) используемых в лазерных приборах полупроводниковых структур с квантоворазмерными эффектами характеризуются большими дипольными моментами, связанными с экситонными переходами. Этим обусловлены относительно сильный нелинейный материальный отклик подобных активных сред и их применение в излучающих элементах нанофотоники [1]. Последнее объясняется возможностью реализации автоколебательных режимов излучения в форме серии регулярных импульсов без использования внешних модулирующих компонентов, синхронизированных с током накачки и усложняющих схему лазерного прибора.

Предложена и качественно исследована расчётная модель компактного лазерного устройства, представляющая систему нелинейных дифференциальных уравнений. Оригинальность модели состоит в учете типичных для полупроводниковых структур с высокой концентрацией КТ эффектов резонансной фазовой нелинейности. В рамках обобщенной двухуровневой схемы взаимодействия, применяемой аналогично [2], в модифицированной модели рассмотрено влияние комплекса связанных с резонансным насыщением инверсии эффектов фазовой нелинейности: резонансная нелинейная рефракция; влияние ближних полей КТ; оптический эффект Штарка. Для ориентации и концентрации образующих среду дипольных КТ характерны конечные времена спонтанной релаксации  $\tau_r$  и  $T$ .

Уравнения балансной модели, обычно называемые скоростными, для переменных мощности ( $x(t) \sim |E(t)|^2$ ) и инверсии заселённости  $y(t)$ , определяющей усиление в ходе вынужденного излучения, формулируются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (Ay - 1) x / \tau_r ; \quad \dot{y} = [\sigma - (1 + Ax) y] / T ; \\ A &= \left[ B^2 + (B\Delta\omega - \kappa y + \beta\tau_r x / 2T)^2 \right]^{-1} ; \quad B = 1 + \beta\kappa (y - 1) . \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$  – параметр тока накачки;  $\beta$ ,  $\kappa$  – коэффициенты нелинейности;  $\Delta\omega$  – линейная часть отстройки спектрального резонанса усиления, испытывающего осциллирующий нелинейный дрейф в ходе вынужденного излучения.

Качественное изучение поведения решений (1) для  $y(\tau)$  вблизи равновесного состояния с ненулевой мощностью  $y_s$  дает возможность оценить зону параметров системы (1), в которой это состояние устойчиво. Тогда на временной шкале кривые, которыми описываются решения для обеих переменных, выходя из начальных точек, после ряда осцилляций «затухают», приближаясь к стацио-

нарными значениями  $x_s, y_s$ . Выражения для равновесных состояний  $x_s, y_s$  следуют из сингулярных пределов системы (1):

$$\sigma = x_s + y_s; \quad \beta\tau_r x_s / 2T = B_s \Delta\omega - \kappa y - \sqrt{y_s - B_s^2}; \quad B_s = 1 + \beta\kappa(y_s - 1). \quad (2)$$

Линеаризация системы (1) в окрестности точек равновесия (2) позволяет записать аналог модели (1) для относительно малых решений  $\Delta x(t)$  и  $\Delta y(t)$  в некоторой области фазового пространства (1) (плоскости  $(x, y)$ ), включающей точки  $x_s, y_s$ . Для решения линеаризованного аналога (1) записывается характеристическое уравнение, выражение комплексных корней  $\lambda_{1,2}$  которого

$$2\lambda_{1,2} = -(1 + F - I/\tau_r) \pm i\sqrt{4(I - F)/\tau_r - (1 + F - I/\tau_r)^2}$$

позволяет сформулировать условие неустойчивости  $x_s, y_s$ , т. е.  $Re \lambda_{1,2} > 0$ , в виде

$$I/\tau_r > 1 + F; \quad I = 2\beta \frac{x_s}{y_s} \sqrt{y_s - B_s^2}; \quad F = \frac{x_s}{y_s} \left[ 1 - \frac{2\kappa}{T} \left( \beta B_s + (1 + \beta\Delta\omega) \sqrt{y_s - B_s^2} \right) \right]. \quad (3)$$

Параметрическим расчетом (3) установлена область коэффициентов системы (1), при которых её решения неустойчивы. Инверсия  $y(t)$  неизбежно насыщается, поэтому неустойчивым решениям  $x(t)$  в фазовой плоскости соответствует аттрактор, представляющий предельный цикл. Решения  $x(t), y(t)$  тогда принимают форму автоколебаний, описывая контрастную регулярную серию пикосекундных импульсов мощности, развивающуюся при постоянной накачке. На рис. 1 изображены примеры моделирования осцилляторных процессов, выполненного интегрированием системы (1) методом Рунге – Кутты.

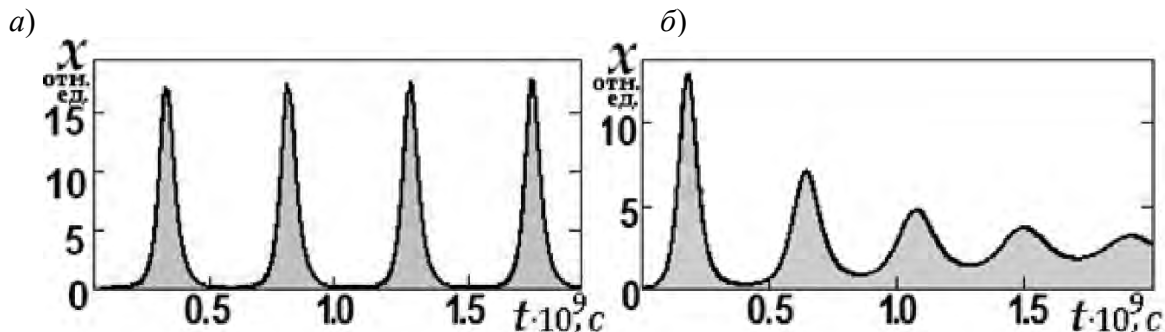


Рис. 1. Временная зависимость нормированной мощности излучения:  $\beta = 0,1$  (а);  $0$  (б);  $\kappa = 1,2$ ;  $\sigma = 1,5$ ;  $\Delta\omega = 1,5$ ;  $\tau_r = 7 \cdot 10^{-11}$  с;  $T = 5 \cdot 10^{-9}$  с

Характерные временные развертки нормированной мощности  $x(t)$  подтвердили решающую роль оптического эффекта Штарка в стимуляции самоподдерживающихся пульсаций интенсивности в лазерах на квантовых точках.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs photon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. V. Ushakov [et al.] // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28, № 17. – P. 25371–25382.
2. Юревич, В. А. Динамика излучения в квантоворазмерных структурах при учете диполь-дипольного взаимодействия / В. А. Юревич, Е. В. Тимошенко, Ю. В. Юревич // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 1 (10). – С. 64–68.

УДК 621.7

## ГИБРИДНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА МОДЕЛИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СОЦИОСИСТЕМЫ ПРИ ИНВАЗИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. Ю. ПЕРЕВАРЮХА<sup>1</sup>, А. В. ПОГОДИНА<sup>2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН<sup>2</sup>Российская академия народного хозяйства и государственной службы  
при Президенте Российской Федерации  
Санкт-Петербург, Россия

В междисциплинарных задачах системного анализа технобиологических процессов при построении моделей структурированного по многим признакам объекта исследования целесообразно включать логически заданные события переключений. Социосистемы испытывают инвазионное воздействие, такое как глобальные пандемии, существенно меняющие экономику общественной жизни и привычные маршруты перемещения. Для моделирования сложных групповых эффектов необходимо включение событийности и логики переопределений для уравнений и представление вариативности моделирующей системы для разных групп. Эпидемии различно влияют на социальные группы [1]. Инвазионные процессы очень вариативны. Биологические популяции в процессе эволюции образуют изолированные группировки, позволяющие осваивать ограниченные ресурсы. Эксплуатация сложных объектов требует и распределенной модели.

Изолирующие механизмы, действующие на разных нерестовых реках или в пределах группы рыб одной реки, принципиально сходны. В обоих случаях это территориальная разобщенность нерестилищ и разновременность нереста. В результате создаётся экологическая дифференциация на самом важном этапе онтогенеза – периоде размножения. Генетические различия между сезонными расами – продукт их длительной эволюции популяций в конкретных условиях.

На основе разработанных представления непрерывно-событийного времени и предикативно-переопределяемых структур для биофизических процессов со стадийностью развития сформируем гибридную модель динамики формирования у новых поколений рыб по их стадиям развития, дополненную вспомогательными уравнениями I-го порядка ситуативного характера. Набор вспомогательных уравнений для сопутствующих показателей развития поколений позволяет гибко настраивать гибридную вычислительную структуру для специфических ситуаций наличия дифференциации, включения действия дополнительных факторов физической среды, связанных с влиянием температуры, скорости течения и площади их нерестилищ. Это определит технологию искусственного восстановления запасов. Модель репродуктивной активности при инвазии будем строить на основе формализации различного жизненного цикла у конкурирующих групп. Логично задать динамику численности поколений двух субпопуляционных групп двумя гибридными структурами, описывающими переходы между тремя стадиями развития у рыб.

Используем следующую организацию структуры в ранее предложенной модели формирования поколений популяции для двух групп, где стадийность будет задана различными образами [2]. Длительность стадий развития у двух

групп различается значительно из-за разных миграционных маршрутов. При разработанной инженерной технологии молодь осетровых рыб этой группы проходила обратный маршрут на пути к морю, взрослея и набирая массу в реке, но потом все равно приспособивалась к морской воде. В целях моделирования ситуации при длительной миграции особей в гетерогенной среде задействуем в гибридной системе модели выживаемости поколения от начальной численности  $N(0)$  на отрезке гибридного времени [3] три стадии развития с различной формой записи убыли численности поколения:  $\alpha$  по трем стадиям развития и общим для всех  $\beta$  с запаздыванием  $\xi$ . Включим уравнение для скорости роста особей  $w(t)$ , вспомогательное логистическое уравнение динамики кормовых организмов  $g(t)$ , влияющей на рост  $w(t)$  особей поколения до его созревания:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha_1 w(t)N(t) + \beta)N(t), & P_1(t); \\ -\alpha_2 N(t) / w(\tau) - \beta N(t), & P_2(t, w(t)); \\ -\alpha_3 w(t - \xi)N(t - \xi) - \beta, & P_3(t, w(t)); \end{cases} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g(t)}{\sqrt[3]{(N(t) + \delta)^2}}, w(0) = w_0; \\ \frac{dg}{dt} = rg(t) \left( 1 - \frac{g(t)}{K} \right), g(0) = g_0. \end{array} \right.$$

Для второй подгруппы используем в системе уравнений стадии I и II с влиянием на убыль поколения начальной численности, добавим температурную поправку [4] и включим коэффициент потребления молодью рыб кормовых организмов. Математическая форма для записи отсчетов событий управления во времени как «гибридное иерархическое непрерывно-событийное» модельное время, как в [5] для моделирования на основе предикативно-переопределяемых структур в задачах биофизики, была описана в предыдущих работах на основе вложенных кортежей. Модель применена для анализа быстрой инвазии.

*Работа выполнена в ходе реализации проекта РНФ № 23-21-00339 «Разработка методов сценарного моделирования экстремальных инвазионных процессов в экосистемах с учетом факторов противодействия на основе динамически переопределяемых вычислительных структур» в СПб ФИЦ РАН.*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борисова, Т. Ю.** Проблемные аспекты моделирования популяционных процессов и критерии их согласования / Т. Ю. Борисова, И. В. Соловьева // Математические машины и системы. – 2017. – № 1. – С. 71–81.
2. **Михайлов, В. В.** Модель сценария интродукции молоди рыб с учетом динамики биогенных элементов / В. В. Михайлов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 2. – С. 20–28.
3. **Дубровская, В. А.** Экстремальные инвазии в экосистемах: метод гибридного моделирования / В. А. Дубровская // Проблемы механики и управления. Нелинейные динамические системы. – 2018. – № 50. – С. 4–11.
4. **Perevaryukha, A. Y.** An iterative continuous-event model of the population outbreak of a phytophagous hemipteran / A. Y. Perevaryukha // Biophysics. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 334–341.
5. **Perevaryukha, A. Y.** A continuous model of three scenarios of the infection process with delayed immune response factors / A. Y. Perevaryukha // Biophysics. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 327–348.

УДК 535

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО  
ОТРАЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПРИЗМЕННОГО УСТРОЙСТВА СВЯЗИ

И. У. ПРИМАК, А. В. ХОМЧЕНКО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Проведенный в [1] анализ внутрирезонаторного отражения света от призмного устройства связи в плосковолновом приближении позволил оценить интенсивность генерируемого лазерного излучения на выходе из резонатора. Такого рода оценка представляет интерес с точки зрения анализа возможностей внутрирезонаторной лазерной спектроскопии в рамках сенсорных приложений. Как известно, волноводные датчики являются одними из самых эффективных, чувствительных устройств, и вопросам их оптимизации посвящено немало работ. В то же время внутрирезонаторные измерения малого поглощения материалов, малых концентраций веществ, давления газов и т. д. демонстрируют высокие возможности внутрирезонаторного метода. Поэтому размещение призмного устройства связи в лазерном резонаторе предполагает расширение возможностей волноводной спектроскопии, сенсорных приложений волноводов и представляет интерес для исследования.

В плосковолновом приближении были проанализированы возможности оптимизации внутрирезонаторного отражения излучения от призмного устройства связи за счет выбора следующих параметров: углов падения на входную грань призмы и основание призмы; толщины буферного слоя, отделяющего призму от волноводной структуры; коэффициента отражения выходного зеркала резонатора. Сравнение полученных результатов с решением задачи оптимизации призмных волноводных датчиков показало, что они вполне сопоставимы. В частности, оптимальные значения толщин буферного слоя отличаются на величину, не превышающую 25 %. Это означает, что полученные ранее решения задачи оптимизации призмных волноводных датчиков можно использовать для первоначальной оценки оптимальных параметров призмного устройства связи в лазерном резонаторе, которые в дальнейшем можно уточнить.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Примак, И. У.** Внутрирезонаторное отражение света от призмы связи в плосковолновом приближении / И. У. Примак, А. В. Хомченко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г.* – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 501–503.



УДК 539.3

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ

И. У. ПРИМАК, А. В. ХОМЧЕНКО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Одной из важных задач при производстве и эксплуатации стекла является анализ и контроль механических напряжений, обусловленных изменением температурного режима. Описание распределений такого рода напряжений в листе стекла требует решения соответствующей термоупругой задачи. Известные исследования термоупругой задачи в пластинах в основном ограничиваются двумя случаями. Рассматривается задача о плоском напряженном состоянии при произвольном двумерном температурном поле [1]. Либо обращаются к задаче о термоупругих напряжениях в пластине при изменении температуры только по ее толщине [1]. В то же время для описания температурного поля (распределения напряжений) в пластине одномерных и двумерных моделей не всегда достаточно. Например, в [2] при анализе распределений коэффициента пропускания света пластиной стекла, в которой создаются термоупругие напряжения, для того чтобы учесть краевые эффекты, использовали трехмерную модель температурного поля.

Исходя из общей формулировки термоупругой задачи [1], получено приближенное аналитическое решение, учитывающее пространственное распределение температурного поля в пластине. На основе этого решения проведен расчет термоупругих напряжений и оптических характеристик нагретой пластины стекла в динамике. Предложена процедура, которая позволяет расширить возможности получения оценок температурных констант стекла (коэффициента температуропроводности, числа  $B_i$ ) на основе анализа распределений интенсивности рассеянного света в нагретом стекле. Проанализированы погрешности определения этих констант, определены условия и предложены пути их снижения. При этом продемонстрировано, что коэффициент теплопроводности может быть определен с погрешностью  $\sim 10\%$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко, А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.
2. Примак, И. У. Моделирование пропускания света стеклом при наличии термоупругих напряжений / И. У. Примак, А. В. Хомченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 396–397.

УДК 517.925

К ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ  
МАТРИЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ РИККАТИ

Д. В. РОГОЛЕВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Рассматривается краевая задача типа [1]

$$\frac{dX}{dt} = G_1(t, X, Y); \quad \frac{dY}{dt} = G_2(t, X, Y); \quad X(0) = X(\omega); \quad Y(0) = Y(\omega), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} G_1(t, X, Y) &= A_1(t)X + D_1(t)XB_1(t) + M_1(t)XN_1(t) + X(S_1(t)X + S_2(t)Y) + \\ &\quad + C_1(t)X^2 + X^2C_2(t) + F_1(t); \\ G_2(t, X, Y) &= A_2(t)Y + D_2(t)YB_2(t) + M_2(t)YN_2(t) + Y(P_1(t)X + P_2(t)Y) + \\ &\quad + Q_1(t)Y^2 + Y^2Q_2(t) + F_2(t), \end{aligned}$$

с коэффициентами класса  $\mathbb{C}(I, \mathbb{R}^{n \times n})$ ,  $(t, X, Y) \in I \times \mathbb{R}^{n \times n} \times \mathbb{R}^{n \times n}$ ;  $I = [0, \omega]$ ,  $\omega > 0$ .

Матричные дифференциальные уравнения Ляпунова, Риккати и их обобщения относятся к многомерным системам специального вида. Эти уравнения играют важную роль в теории и приложениях дифференциальных уравнений [2]. Были получены конструктивные достаточные условия однозначной разрешимости задачи (1) и итерационный алгоритм классического типа построения решения.

Приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} D &= \{(t, X, Y) : 0 \leq t \leq \omega, \|X\| \leq \rho_1, \|Y\| \leq \rho_2\}, \quad \tilde{A}_i(\omega) = \int_0^\omega A_i(\tau) d\tau, \quad \gamma_i = \|\tilde{A}_i^{-1}(\omega)\|, \\ \alpha_i &= \max_t \|A_i(t)\|, \quad \beta_i = \max_t \|B_i(t)\|, \quad d_i = \max_t \|D_i(t)\|, \quad m_i = \max_t \|M_i(t)\|, \quad n_i = \max_t \|N_i(t)\|, \\ \delta_i &= \max_t \|S_i(t)\|, \quad \mu_i = \max_t \|P_i(t)\|, \quad \sigma_i = \max_t \|C_i(t)\|, \quad \nu_i = \max_t \|Q_i(t)\|, \quad h_i = \max_t \|F_i(t)\|, \\ q_{11} &= \gamma_1 [0,5 \cdot \alpha_1 \omega^2 (\alpha_1 + \beta_1 d_1 + m_1 n_1 + 2(\delta_1 + \sigma_1 + \sigma_2) \rho_1 + \delta_2 \rho_2) + \\ &\quad + \omega (\beta_1 d_1 + m_1 n_1 + 2(\delta_1 + \sigma_1 + \sigma_2) \rho_1 + \delta_2 \rho_2)], \quad q_{12} = \gamma_1 \delta_2 \rho_1 \omega (0,5 \cdot \alpha_1 \omega + 1), \\ q_{21} &= \gamma_2 \mu_1 \rho_2 \omega (0,5 \cdot \alpha_2 \omega + 1), \\ q_{22} &= \gamma_2 [0,5 \cdot \alpha_2 \omega^2 (\alpha_2 + \beta_2 d_2 + m_2 n_2 + \mu_1 \rho_1 + 2(\mu_2 + \nu_1 + \nu_2) \rho_2) + \\ &\quad + \omega (\beta_2 d_2 + m_2 n_2 + \mu_1 \rho_1 + 2(\mu_2 + \nu_1 + \nu_2) \rho_2)], \end{aligned}$$

где  $t \in I$ ,  $\rho_1, \rho_2 > 0$ .

Задача (1) изучается с помощью конструктивного метода [3] в конечномерной банаховой алгебре  $\mathfrak{B}(n)$  непрерывных матриц-функций  $T(t)$  с нормой  $\|T\|_C = \max_t \|T(t)\|$ , где  $\|\cdot\|$  – определенная норма матриц в этой алгебре. Предлагаемая работа является развитием и обобщением [1].

**Теорема.** Пусть выполнены следующие условия:

$$1) \det \tilde{A}_i \neq 0 \quad (i=1,2); \quad (2)$$

$$2) \quad \gamma_1 \left\{ 0,5 \cdot \alpha_1 \omega^2 \left[ (\alpha_1 + \beta_1 d_1 + m_1 n_1) \rho_1 + (\delta_1 + \sigma_1 + \sigma_2) \rho_1^2 + \delta_2 \rho_1 \rho_2 + h_1 \right] + \right. \\ \left. + \omega \left( (\beta_1 d_1 + m_1 n_1) \rho_1 + (\delta_1 + \sigma_1 + \sigma_2) \rho_1^2 + \delta_2 \rho_1 \rho_2 + h_1 \right) \right\} \leq \rho_1; \quad (3)$$

$$\gamma_2 \left\{ 0,5 \cdot \alpha_2 \omega^2 \left[ (\alpha_2 + \beta_2 d_2 + m_2 n_2) \rho_2 + (\mu_2 + \nu_1 + \nu_2) \rho_2^2 + \mu_1 \rho_1 \rho_2 + h_2 \right] + \right. \\ \left. + \omega \left( (\beta_2 d_2 + m_2 n_2) \rho_2 + (\mu_2 + \nu_1 + \nu_2) \rho_2^2 + \mu_1 \rho_1 \rho_2 + h_2 \right) \right\} \leq \rho_2;$$

$$3) \quad q_{11} < 1, \det(E - Q) > 0, \text{ где } E = \text{diag}(1,1), Q = (q_{ij}). \quad (4)$$

Тогда задача (1) однозначно разрешима в области  $D$ .

Данная задача сведена к эквивалентной интегральной задаче

$$X(t) = \tilde{A}_1^{-1}(\omega) \left\{ \int_0^t \left( \int_0^\tau A_1(\sigma) d\sigma \right) G_1(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \right. \\ \left. - \int_t^\omega \left( \int_\tau^\omega A_1(\sigma) d\sigma \right) G_1(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \int_0^\omega \left[ G_1(\tau, X(\tau), Y(\tau)) - A_1(\tau) X(\tau) \right] d\tau \right\}; \quad (5)$$

$$Y(t) = \tilde{A}_2^{-1}(\omega) \left\{ \int_0^t \left( \int_0^\tau A_2(\sigma) d\sigma \right) G_2(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \right. \\ \left. - \int_t^\omega \left( \int_\tau^\omega A_2(\sigma) d\sigma \right) G_2(\tau, X(\tau), Y(\tau)) d\tau - \int_0^\omega \left[ G_2(\tau, X(\tau), Y(\tau)) - A_2(\tau) Y(\tau) \right] d\tau \right\}. \quad (6)$$

Система (5), (6) записана в операторном виде

$$X = \mathcal{L}_1(X, Y), \quad Y = \mathcal{L}_2(X, Y), \quad (7)$$

где через  $\mathcal{L}_i (i=1,2)$  обозначены соответствующие интегральные операторы в (5), (6).

Эти операторы действуют из  $\mathbb{C}$  в  $\mathbb{C}^1$  на множестве  $\{(X(t), Y(t)) : \|X\|_C < \infty, \|Y\|_C < \infty\}$ .

Решение системы (7) строится классическим методом последовательных приближений:

$$X_{k+1} = \mathcal{L}_1(X_k, Y_k), Y_{k+1} = \mathcal{L}_2(X_k, Y_k), \quad k=0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где  $X_0, Y_0$  – произвольные матричные функции класса  $\mathbb{C}[0, \omega]$ , принадлежащие множеству  $\tilde{D} = \{(X(t), Y(t)) : \|X\|_C \leq \rho_1, \|Y\|_C \leq \rho_2\}$ .

Изучены вопросы сходимости, скорости сходимости алгоритма (8).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лаптинский, В. Н.** Конструктивные методы построения решения периодической краевой задачи для системы матричных дифференциальных уравнений типа Риккати / В. Н. Лаптинский, Д. В. Роголев // Дифференциальные уравнения. – 2011. – Т. 47, № 10. – С. 1412–1420.
2. **Анисович, В. В.** Об одном подходе к решению задач оптимального управления / В. В. Анисович, Б. И. Крюков, В. М. Мадорский // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 251, № 2. – С. 265–268.
3. **Лаптинский, В. Н.** Конструктивный анализ управляемых колебательных систем / В. Н. Лаптинский. – Минск: ИМ НАН Беларуси, 1998. – 300 с.

УДК 533.6

К ПРИБЛИЖЕННОМУ АНАЛИТИЧЕСКОМУ РЕШЕНИЮ  
ЗАДАЧИ ФОЛКНЕРА – СКЭН

А. А. РОМАНЕНКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Задача о динамическом ламинарном пограничном слое в автомодельном случае описывается соотношениями Фолкнера – Скэн [1, с. 160; 2, с. 177]

$$f''' + a f f'' + b(1 - f'^2) = 0; \quad (1)$$

$$f(0) = f'(0) = 0, \quad f'(\infty) = 1, \quad (2)$$

где  $f' = df(\eta)/d\eta$ ,  $a = (m+1)/2$ ,  $b = m$ ;  $m$  – параметр, характеризующий скорость  $U(x) = U_0 x^m$  внешнего течения, при этом, согласно [1, 2],  $0 \leq m \leq 1$ .

Так как эта задача не имеет точного аналитического решения (см. библиографию, например, в [3]), то построение приближенных решений является целесообразным с точки зрения возможных приложений [1, 2]. Такие решения позволяют изучить влияние физических параметров на формирование пограничного слоя.

Одно из эффективных (в смысле точности [1, 2]) приближенных аналитических решений, приведенных в [4], имеет вид

$$f(\eta, m) = \begin{cases} \lambda \int_0^\eta (\eta - \tau) \exp \left( - \left( \frac{b}{\lambda} \tau + \left( \frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left( 2 \left( \frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} \right) \right) d\tau, & m \in \left[ 0, \frac{1}{3} \right); \\ \lambda \int_0^\eta (\eta - \tau) \exp \left( - \left( \frac{b}{\lambda} \tau + \left( \frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left( 2 \left( \frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} + \left( 6 \left( \frac{b}{\lambda} \right)^4 - 2b^2 \right) \frac{\tau^4}{4!} \right) \right) d\tau, & m \in \left[ \frac{1}{3}, 1 \right]. \end{cases}$$

При  $m \in [0, 1/3)$  значения  $\lambda = f''(0, m) \equiv \lambda(m)$  вычисляются из уравнения

$$\lambda \int_0^\infty \exp \left( - \left( \frac{b}{\lambda} \tau + \left( \frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left( 2 \left( \frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} \right) \right) d\tau - 1 = 0,$$

а при  $m \in [1/3, 1]$  – из уравнения

$$\lambda \int_0^\infty \exp \left( - \left( \frac{b}{\lambda} \tau + \left( \frac{b}{\lambda} \right)^2 \frac{\tau^2}{2!} + \left( 2 \left( \frac{b}{\lambda} \right)^3 + (a - 2b)\lambda \right) \frac{\tau^3}{3!} + \left( 6 \left( \frac{b}{\lambda} \right)^4 - 2b^2 \right) \frac{\tau^4}{4!} \right) \right) d\tau - 1 = 0.$$

Верхний предел в несобственных интегралах принимают равным 8,8 [1, 2].

В данной работе, являющейся продолжением и дополнением к [4], получена аппроксимация для параметра  $\lambda = \lambda(m)$ , играющего важную роль в теории динамического ламинарного пограничного слоя. Этот параметр связан с вычислением касательного напряжения (см., например, [1, 2])

$$\lambda(m) = \begin{cases} a_0 + a_1 m + a_2 m^2, & a_0 = 0,33531, a_1 = 1,72212, a_2 = -1,38428, m \in [0, 1/3); \\ b_0 + b_1 m + b_2 m^2, & b_0 = 0,43914, b_1 = 1,04461, b_2 = -0,25214, m \in [1/3, 1]. \end{cases} \quad (3)$$

График этой функции изображен на рис. 1.

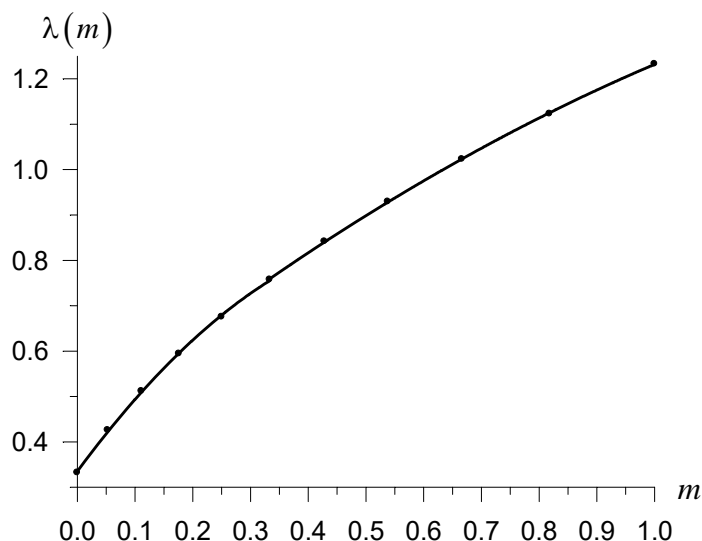


Рис. 1. График функции  $\lambda(m)$ : точки соответствуют точным численным значениям  $\lambda$ , а сплошная линия – приближению (3)

Для функции  $\lambda(m)$  справедлива двусторонняя оценка  $a_0 \leq \lambda(m) \leq b_0 + b_1 + b_2$ , т. е.  $0,33531 \leq \lambda(m) \leq 1,23161$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – Москва: Наука, 1974. – 712 с.
2. Теория тепломассообмена: учебник для вузов / С. И. Исаев [и др.]; под ред. А. И. Леонтьева. – Москва: Высшая школа, 1979. – 495 с.
3. Khidir, A. A note on the solution of general Falkner – Skan problem by two novel semi-analytical techniques / A. Khidir // Propulsion and Power Research. – 2015. – Vol. 4, iss. 4. – P. 212–220.
4. Лаптинский, В. Н. К аналитическому решению задачи о динамическом ламинарном пограничном слое в автомоделном случае / В. Н. Лаптинский, А. А. Романенко // Актуальные проблемы науки и техники: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Сарапул: СПИ, 2022. – С. 55–59.

УДК 53.088 : 620.179.14

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Безгистерезисное намагничивание материала [1] исключает влияние гистерезиса на намагничивание ферромагнетика. Оно заключается в том, что одновременно с постоянным намагничивающим полем на материал действуют переменным магнитным полем, доводящим материал до технического насыщения, после чего амплитуду переменного поля плавно уменьшают до нуля. При этом получают кривую безгистерезисного намагничивания, которая имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. Использование безгистерезисного намагничивания важно для резкого повышения чувствительности разных магнитных элементов. Но для ее определения проводят полный цикл многочисленных измерений. Это усложняет определение безгистерезисной кривой намагничивания материала и снижает его точность.

Целью работы является упрощение определения безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала.

Для моделирования безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала воспользуемся тем, что она близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса [1]. Экспериментальная проверка показала [2], что погрешность определения безгистерезисной кривой намагничивания при таком подходе на начальном участке не превышает 3 %.

Методика [3] моделирования безгистерезисной кривой намагничивания основана также на том, что зависимости изменения намагниченности  $M$  ферромагнитного материала от напряженности  $H$  действующего намагничивающего поля на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях петли гистерезиса ферромагнитного материала могут быть аппроксимированы формулами Фрелиха следующим образом:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H} ; \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H} . \quad (2)$$

Это утверждение обосновано многочисленными использованиями формулы (1) для аппроксимации изменения намагниченности  $M$  ферромагнитного материала во втором квадранте плоскости  $(M, H)$ .

Значениям намагниченности  $M$  соответственно на нисходящей и восходящей ветвях предельной петли магнитного гистерезиса соответствуют значения  $H_1$  и  $H_2$  напряженности намагничивающего поля (рис. 1).

Из (1) и (2) имеем

$$M = \frac{M_r M_s (H_c - H_1)}{M_s H_c - M_r H_1} ; \quad (3)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H_2 - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H_2} \quad (4)$$

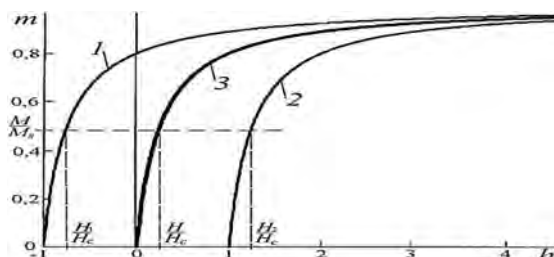


Рис. 1. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви петли гистерезиса и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные в безразмерных координатах ( $h = H/H_c$ ,  $m = M/M_s$ ) по формулам (1), (2) и (5) для материала с  $K_{II} = 0,8$

Из (3) и (4) имеем

$$H_1 = \frac{M_s H_c (M_r - M)}{M_r (M_s - M)};$$

$$H_2 = \frac{H_c (M_s M - 2M_r M + M_s M_r)}{M_r (M_s - M)}.$$

Полусумма напряженностей  $H_1$  и  $H_2$  магнитного поля (с учетом их знака) равна напряженности поля  $H$  на безгистерезисной кривой намагничивания (см. рис. 1):

$$H = \frac{H_2 - H_1}{2} = \frac{M H_c (M_s - M_r)}{M_r (M_s - M)}.$$

Откуда

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H} \quad (5)$$

Введя обозначения  $K_{II} = M_r/M_s$ ,  $m = M/M_s$ ,  $h = H/H_c$  и проведя алгебраические преобразования из (5), получим

$$m = [1 + (1 - K_{II})/K_{II}h]^{-1} \quad (6)$$

Формула (6) получена математически точно на основании экспериментально обоснованной в [1, 2] методики и экспериментально обоснованных зависимостей (1) и (2). Она не требует дополнительного экспериментального обоснования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бозорт, Р.** Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 784 с.
2. Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющих сталях / А. Н. Шашков [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 36–42.
3. **Сандомирский, С. Г.** Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 55–60.

УДК 339.178

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ ADL ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

А. В. АЛЕКСАНДРОВ, Д. А. АЛМАКАЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одним из способов обоснования будущей бизнес-стратегии является матрица ADL [1], позволяющая выявить наиболее перспективные направления развития компании и распределить ресурсы между ними.

Портфель бизнеса ОАО «Бабушкина крынка» включает следующие стратегические зоны хозяйствования (СЗХ): молоко и молочные продукты (1); кисло-молочные продукты (2); масло сливочное и маргарин (3); сыры (4); мороженое (5); конфеты молочные (6); молочные коктейли и напитки на основе молока (7); сухие молочные продукты (8); йогурты (9).

На основании анализа стадий жизненного цикла и конкурентных позиций указанных СЗХ построена матрица ADL (рис. 1).



Рис. 1. Матрица ADL для ОАО «Бабушкина крынка»

Таким образом, для сухих молочных продуктов наиболее эффективной стратегией развития будет стратегия поддержания жизнеспособности; для конфет молочных, масла сливочного и маргарина – стратегия избирательного развития; для остальных СЗХ – стратегия естественного развития.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов, В. С. Классические модели стратегического анализа и планирования: модель ADL/LC / В. С. Ефремов // Менеджмент в России и за рубежом. – 1998. – № 1. – С. 117–130.



УДК 339.178

**СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОРТФЕЛЯ БИЗНЕСА  
ОАО «БАБУШКИНА КРЫНКА»**

А. В. АЛЕКСАНДРОВ, Д. А. АЛМАКАЕВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Одним из способов анализа и планирования в стратегическом маркетинге является модель Хофера – Шенделя [1], основанная на сопоставлении рыночных перспектив и конкурентных преимуществ каждого из видов бизнеса компании (стратегических зон хозяйствования, СЗХ) с целью определения для них оптимальных стратегий развития.

ОАО «Бабушкина крынка» является одним из крупнейших производителей натуральной молочной продукции в Республике Беларусь. Портфель бизнеса предприятия представлен в табл. 1.

Табл. 1. Исходные данные для построения матрицы Хофера – Шенделя

Наименование СЗХ	Номер на рис. 1	Стадия жизненного цикла продукта	Относительная конкурентная позиция
Молоко, молочные продукты (далее – молоко)	1	Зрелость	Ведущая
Кисломолочные продукты	2	Зрелость	Сильная
Масло сливочное и маргарин (далее – масло сливочное)	3	Зрелость	Средняя
Сыры	4	Рост	Сильная
Мороженое	5	Рост	Слабая
Конфеты молочные	6	Внедрение	Слабая
Молочные коктейли и напитки на основе молока (далее – молочные коктейли)	7	Рост	Средняя
Сухие молочные продукты	8	Рост	Слабая
Йогурты	9	Рост	Ведущая

Молоко, кисломолочные продукты, масло сливочное находятся на стадии зрелости. Продукция давно производится и хорошо известна потребителям, объемы продаж стабильные. Основными конкурентами являются аналогичные продукты брендов «Савушкин продукт», «Молочные горки» и др., однако развитая система дистрибуции, хороший имидж и известность ОАО «Бабушкина крынка», а также высокое качество продукции позволяют удерживать хорошие конкурентные позиции – ведущую по молоку, сильную по кисломолочным продуктам, среднюю по маслу сливочному. По данным продуктам предприятие оказывает сильное влияние на рынок отрасли.

Сыры, мороженое, молочные коктейли, сухие молочные продукты и йогурты находятся на стадии роста. Наблюдается увеличение продаж данных продуктов за счет углубления ассортимента. ОАО «Бабушкина крынка» является

ведущим производителем йогуртов, по сырам и молочным коктейлям также занимает достаточно прочные позиции на рынке (сильную и среднюю соответственно), однако уступает более известным конкурентам на рынке мороженого (ОАО «Могилевская фабрика мороженого», ОАО «Савушкин продукт», ОАО «Морозпродукт» и т.п.) и сухих молочных продуктов (ОАО «Беллакт»).

Конфеты молочные находятся на стадии внедрения, товар является сравнительно новым для предприятия. Соответственно, слабая конкурентная позиция обусловлена тем, что продукт малоизвестен потребителям.

На рис. 1 представлена матрица Хофера – Шенделя для рассмотренных СЗХ ОАО «Бабушкина кринка». Здесь размер круга пропорционален доле СЗХ в портфеле бизнеса предприятия, а сектор в круге – относительной доле продаж предприятия на соответствующем рынке.



Рис. 1. Модель Хофера – Шенделя для портфеля бизнеса ОАО «Бабушкина кринка»

Таким образом, ОАО «Бабушкина кринка» следует использовать:

- для молока, кисломолочных продуктов – стратегию увеличения прибыли;
- для сыров, мороженого, молочных коктейлей – стратегию роста;
- для йогуртов – стратегию увеличения доли рынка;
- для молочных конфет – стратегию расширения рынка;
- для сухих молочных продуктов – стратегию раскрутки;
- для масла сливочного – стратегию обеспечения безубыточности и снижения издержек.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефремов, В. С.** Классические модели стратегического анализа и планирования: модель HOFER/SCHENDEL / В. С. Ефремов // Менеджмент в России и за рубежом. – 1998. – № 2. – С. 121–132.

УДК 338.2:65.011

## УСТОЙЧИВОСТЬ БИЗНЕСА: ПОНЯТИЕ И КОМПОНЕНТЫ

С. А. АЛЕКСАНДРОВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Одной из наиболее серьезных проблем, с которыми сталкивается современный бизнес, является неопределенность и неустойчивость его деятельности. Это приводит к снижению прогнозируемости и управляемости бизнесом, следовательно, для руководителей и собственников актуальным является определение общей концепции устойчивости бизнеса и отдельных компонентов данного понятия для разработки показателей и критериев оценки устойчивости бизнеса и повышения степени управляемости.

Устойчивость бизнеса можно рассматривать через призму следующих характеристик данного понятия:

- успешность – достижение поставленных целей, обеспечение должного уровня эффективности;
- равномерность (стабильность) – отсутствие выраженных колебаний в ключевых показателях эффективности;
- тренд – наличие положительной тенденции в изменении показателей эффективности во времени.

В свою очередь, можно выделить разные функциональные сферы или компоненты устойчивости. Современная наука и практика рассматривает разные подходы к пониманию видов устойчивости. На основе их изучения был составлен следующий набор компонентов (или аспектов) общей устойчивости бизнеса.

1. Финансовая устойчивость – способность бизнеса обеспечить свою деятельность источниками финансирования в нужном объеме и в нужные сроки на приемлемых условиях.

2. Экологическая устойчивость – вытекает из концепции устойчивого развития общества, что накладывает на бизнес обязательства эколого-ответственного поведения, заботы об окружающей среде и благополучии общества.

3. Социальная устойчивость – имеет общие корни с экологической устойчивостью, определяется социальной ответственностью бизнеса перед работниками и обществом.

4. Экономическая устойчивость – обеспечение высоких показателей экономической эффективности деятельности, что позволяет финансировать мероприятия по развитию бизнеса.

5. Технологическая устойчивость – использование прогрессивных, наукоемких технологий в соответствии с требованиями времени и развитием науки.

6. Динамическая устойчивость – стабильность и поступательность развития бизнеса во времени.

УДК 656.078

## СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОПЕРАТОРА В ЦЕПИ ПОСТАВОК

С. А. АЛЕКСАНДРОВА, А. О. ЧУКОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Цепи поставок представляют собой сложные организационные структуры, где эффективность работы каждого участника играет решающую роль. Измерение эффективности логистической деятельности представляет собой важный аспект управления цепочками поставок.

Следовательно, формирование системы показателей оценки работы логистического оператора с целью обеспечения оптимального функционирования цепи поставок является важной стратегической задачей. Формирование такой системы возможно в два этапа:

- 1) определение ключевых операций, видов работ или зон ответственности;
- 2) определение набора ключевых показателей эффективности (КРІ) для каждой операции, работы или зоны ответственности.

Система показателей работы логистического оператора в цепи поставок должна обеспечить возможности оценки по следующим направлениям.

1. Производительность доставки подразумевает задержки и время доставки отгрузок между различными точками в цепи поставок, оценку эффективности оператора в соблюдении сроков доставки. КРІ этой группы помогут оценить эффективность оператора в соблюдении сроков доставки.

2. Уровень сервиса характеризует количество пунктуальных доставок, консолидированное количество бракованных или потерянных отправок. КРІ этой группы должны дать возможность измерить уровень обслуживания оператора и его способность удовлетворить требования клиентов.

3. Использование ресурсов – это эффективность использования ресурсов, таких как транспортные средства и складские помещения, а также других видов ресурсов. Анализ этих показателей поможет выявить потенциальные возможности по снижению издержек и оптимизации использования ресурсов.

4. Запасы характеризуются величиной, оборачиваемостью и точностью управления. Использование КРІ должно помочь измерить эффективность работы оператора в управлении запасами.

5. Стоимость обработки заказа включает идентификацию и анализ расходов на обработку и выполнение заказа и позволяет определить эффективность оператора в минимизации издержек.

Были проанализированы существующие показатели работы логистического оператора в цепи поставок и отобраны конкретные КРІ, позволяющие оценить производительность доставки, уровень сервиса, использование ресурсов, запасы и стоимость обработки заказа. Кроме того, предлагается объединить родственные КРІ одной группы в сводный индекс по каждому направлению деятельности (табл. 1).

Табл. 1. Ключевые показатели работы цепи поставок

Интегральный индекс	Показатель эффективности
Индекс обслуживания клиентов	Процент выполненных заказов в срок; уровень удовлетворенности клиентов; доля постоянных клиентов
Индекс запасов	Скорость оборачиваемости запасов; среднее время нахождения товаров на складе
Индекс использования транспортных ресурсов	Заполненность транспортных средств; эффективность маршрутизации; уровень простоев; производительность транспортных средств
Индекс обработки заказов	Скорость обработки заказов; процент ошибок при обработке заказов
Индекс использования складских ресурсов	Заполненность складских помещений; скорость обработки товаров на складе
Индекс общих логистических затрат	Общие расходы на логистику; доля расходов на логистику в общих операционных расходах; удельные логистические затраты
Индекс эффективности транспортировки	Расходы на перевозку груза как процент от общих логистических расходов; количество перевезенных товаров на единицу измерения топлива
Индекс управления обратными потоками	Эффективность процесса возврата товаров; сокращение потерь при обработке возвратов
Индекс устойчивости цепочки поставок	Равномерность поставок; ритмичность поставок; доля поставок с отклонением от графика

Предложенные показатели помогают оценить различные аспекты логистической деятельности и выявить области, где можно улучшить эффективность и оптимизировать процессы. Они могут использоваться при оценке как отдельных логистических компаний, так и логистических систем, легко измеряются и встраиваются в систему оперативного, тактического и стратегического планирования в современных логистических компаниях. Кроме того, именно на этих показателях может строиться система контроля эффективности работы логистической системы, а также система управленческого учета компании.

Использование системы показателей оценки своей работы позволяет логистическим операторам оценить и повысить эффективность деятельности, оптимизировать использование ресурсов и улучшить уровень обслуживания клиентов.

УДК 332 145

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕР СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЮГО-ВОСТОКА МОГИЛЕВСКОЙ ОБЛАСТИ

А. Г. БАРАНОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Согласно Программе социально-экономического развития юго-восточного региона Могилевской области на период до 2020 года тремя важнейшими приоритетами развития юго-востока Могилевской области приняты активизация бизнеса, сельское хозяйство и строительство жилья.

Среди конкретных мер создания условий развития юго-восточного региона Могилевской области указ Президента № 235 от 8 июня 2015 г. предусматривает снижение налоговой нагрузки для субъектов экономики, реализацию инвестиционных проектов за счет льготных кредитов, изыскание финансовых ресурсов для поддержки сельхозотрасли, проработку льготных условий для строительства жилья. В приказе Президента № 177 от 28 мая 2020 г. перечислены дополнительные меры: предоставление выплат из бюджета на возмещение части затрат по инновационным проектам; райисполкомам предоставлены полномочия в распоряжении неиспользуемым или неэффективно используемым имуществом республиканской собственности.

Очевидно, что реализация этих мер должна была сохранить и привлечь трудовые ресурсы, сделать более привлекательным проживание на юго-востоке области, привести к сближению уровня жизни депрессивных районов и области в целом.

Однако анализ тенденций и результатов развития региона за период 2015–2023 гг., выполненный с использованием статистических сборников Национального статистического комитета Республики Беларусь, показывает, что по многим направлениям развития значимых достижений не наблюдается. Отставание от среднего уровня развития Могилевской области не сокращается, а по ряду позиций, напротив, увеличивается.

Результаты развития юго-востока Могилевщины за истекший период выглядят следующим образом.

1. Программа развития юго-востока Могилевской области реализуется с 2015 г. За прошедший девятилетний период заметных успехов практически не достигнуто: доля региона в промышленном производстве не увеличилась; производство зернобобовых и овощных культур (основа сельского хозяйства) значительно уступает другим регионам области как по объему, так и по урожайности; строительство жилья резко сократилось; не удалось замедлить отток населения и сокращение трудовых ресурсов; розничный товароборот в юго-восточных районах существенно уступает среднему по области.

2. Развитие районов при этом неравномерно. Ряд показателей развития Костюковичского и Кричевского районов сравним и опережает среднеобластной (рост выручки от реализации продукции, производительность труда,

рентабельность продаж и др.). По остальным районам наблюдается значительное отставание, порой в несколько раз (в Хотимском и Чериковском районах рентабельность продаж даже отрицательна; урожайность зерновых и зернобобовых в Климовичском и Костюковичском районах последние два года более чем в 2 раза уступает среднеобластной).

3. Доля региона в промышленном производстве области и в 2015 г., и в 2022 г. составила 7 %.

4. В целом по области в 2022 г. валовой сбор зерновых и зернобобовых увеличился, по сравнению с 2015 г., в 1,06 раза, а на юго-востоке составил только 0,79 от уровня 2015 г. При этом доля региона в общеобластном сборе уменьшилась с 24,2 % до 17,9 %.

5. В наиболее «благополучном» Климовичском районе падение ввода жилья в 2022 г., по сравнению с 2015 г., составило 3,31 раза. В остальных районах ввод жилых домов практически прекращен.

6. Население Могилевской области с 2016 г. уменьшилось с 1051260 до 989703 чел. или на 5,86 %; в рассматриваемых районах – от 9,9 % до 13,1 %.

7. В 2022 г. в районах юго-востока товарооборот на душу населения заметно уступал среднеобластному: от 76,2 % по региону до 64,8 % в Хотимском районе [1].

Сохраняется отставание регионов юго-востока в сельском хозяйстве, строительстве, уровне жизни населения. Уменьшение численности населения региона происходит более быстрыми темпами, чем области в целом.

Для сохранения и развития потенциала юго-восточного региона можно предложить следующие мероприятия.

1. Целесообразно объединить малочисленные Краснопольский и Хотимский районы с соседними районами. Это позволит реализовать синергический эффект и сократить расходы по управлению районами.

2. Следует проработать вопрос о введении повышающего коэффициента к зарплате работников региона (по опыту северных надбавок РФ). Это позволит уменьшить отток кадров из региона, а при существенном размере надбавок и приток работников из других регионов.

3. Правильным представляется опережающее, по сравнению с другими регионами, развитие социальной сферы юго-восточного региона. Это будет способствовать сохранению и развитию его демографического потенциала.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регионы Республики Беларусь. Социально-экономические показатели // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2023. – Т. 1. – 888 с.

УДК 332 145

## ПОТЕНЦИАЛ РЕГИОНА И ЕГО РАЗВИТИЕ

А. Г. БАРАНОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Потенциал – совокупность всех имеющихся возможностей, средств в какой-либо области, сфере. В широком смысле это средства, запасы, источники, которые имеются в наличии и могут быть мобилизованы, приведены в действие, использованы для достижения определённой цели, осуществления плана, решения какой-либо задачи; возможности предприятия, общества, государства в определенной области.

Потенциал региона будем рассматривать как:

- способность экономики и социальной структуры региона удовлетворять материальные и духовные потребности населения, обеспечивая развитие производства и потребления в регионе на современном уровне;
- совокупность ресурсов (природных, трудовых и финансовых), которыми располагает регион.

Для характеристики потенциала региона целесообразно выделить его виды и компоненты.

В соответствии с концепцией устойчивого развития региона изначально можно выделить следующие виды его потенциалов (табл. 1).

Табл. 1. Виды потенциалов региона

Вид потенциала	Определение
Экономический	Совокупная способность отраслей и предприятий региона производить продукцию, осуществлять капитальное строительство, перевозить грузы, оказывать услуги населению и т. д.
Социальный	Совокупность отраслей, предприятий, учреждений и ресурсов непродуцированной сферы, различных видов общественной деятельности, обеспечивающих жизнедеятельность населения региона
Экологический	Доступная для человека совокупность природных ресурсов и условий, способная без ущерба для себя (т. е. для механизмов своего функционирования и самовосстановления) отдавать необходимые человеку ресурсы, обеспечивающие жизнедеятельность общества

К числу компонентов потенциала региона следует отнести природные, ресурсные, производственные, организационные составляющие (табл. 2).

Развитие потенциала региона может осуществляться по многим направлениям: расширение производственной базы; более полное использование природных ресурсов; активизация человеческого фактора и т. п.

Рассмотрим некоторые мероприятия, которые реализуются для развития потенциала юго-востока Могилевской области.

Применительно к природным компонентам потенциала юго-восточного региона предусмотрены следующие меры его наращивания:



- реализация проектов в солнечной и ветряной энергетике;
- создание транспортного коридора Гродно – Минск – Могилев – Кричев – Рославль – Западный Казахстан [2, 3].

Табл. 2. Характеристика основных компонентов потенциала региона

Вид компонента	Состав компонента
Природный	Разновидности природного компонента: геополитический, транзитный, рекреационный, туристический, энергетический
Ресурсный	Виды ресурсов: человеческие, трудовые, интеллектуальные, финансовые, информационные, инвестиционные, демографические, потребительские
Организационный	Состав компонента: научный, инновационный, инвестиционный, институциональный, административно-управленческий
Производственный	Состав компонента: промышленный, сельскохозяйственный, экспортный, инфраструктурный, потребительский

Относительно трудовых ресурсов рассматриваемого региона уместно привести оценку помощника Президента. Инспектор по Могилевской области Леонид Мартынюк отметил, что в юго-восточных районах Могилевской области особое внимание уделяется формированию кадрового потенциала. Причем сегодня ценится их активная гражданская позиция, желание быть полезным в развитии родного края. Этому уделяется пристальное внимание.

Для повышения организационного потенциала предусматривается:

- распространить нормы указа № 506 о развитии Оршанского района на юго-восток Могилевской области. Там большой пакет налоговых, инвестиционных, финансовых преференций, льгот по работе с неиспользуемым имуществом;
- объявить весь этот регион Могилевской области свободной экономической зоной;
- заводы в сфере деревообработки, промышленности, стройматериалов, переработки сельхозпродукции либо альтернативной энергетики – какие-то точечные проекты можно включать в пределы свободной экономической зоны «Могилев» [1–3].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. От международной трассы до солнечной энергетике – в чем видят потенциал юго-востока Могилевской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belta.by/regions/view/ot-mezhdunarodnoj-trassy-do-solnechnoj-energetiki-v-chem-vidjat-potentsial-jugovostoka-mogilevskoj-358312-2019>.
2. Чем живут и как развиваются юго-восточные территории Могилевской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.tvr.by/news/obshchestvo/chem\\_zhivut\\_i\\_kak\\_razvivayutsya\\_yugo\\_vostochnye\\_territorii\\_mogilevskoy\\_oblasti/](https://www.tvr.by/news/obshchestvo/chem_zhivut_i_kak_razvivayutsya_yugo_vostochnye_territorii_mogilevskoy_oblasti/).
3. Итоги и перспективы развития юго-восточного региона Могилевщины на основании соответствующего Указа Президента [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/semero-v-lodke-ne-schitaya-investitsiy.html>.

УДК 65.115

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ  
НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИТ. А. БОРОДИЧ, О. Г. ГУДЫНО  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Логистическое управление транспортными потоками – это важный элемент в оптимизации работы предприятий с собственным парком подвижного состава, а также в снижении затрат на перевозку. В рамках управления транспортными потоками осуществляются планирование, организация и контроль маршрутов, управление парком транспортных средств и цифровизация.

Среди цифровых технологий, используемых для цифровизации управления транспортными потоками, можно выделить ITS, IoT, блокчейн, систему предиктивной аналитики, виртуальную и дополненную реальность. Кроме перечисленных цифровых технологий, совершенствованию управления транспортными потоками может способствовать развитие каршеринговых сервисов, поскольку совместное использование автомобилей позволяет уменьшить загруженность дорог. При этом развитие электроавтомобилей и зарядной инфраструктуры может значительно улучшить экологическую ситуацию в городах и снизить затраты на топливо для транспортных компаний.

Рассмотрим проведённую оценку эффективности управления транспортными потоками на примере одного из крупнейших предприятий Могилевской области – ОАО «Бабушкина крынка». Для осуществления перевозок предприятие использует собственный парк транспортных средств.

Основное подразделение «Могилев», согласно отчёту по перевезённой продукции, за первое полугодие 2022 г. имеет пробег примерно 1,648 млн км, 2023 г. – примерно 1,099 млн км, вес перевезённого груза составляет примерно 34 и 27 тыс. т соответственно. Всего за данный период в 2022 г. было сделано около 7600 внутриреспубликанских рейсов 85 автомобилями, в 2023 г. – около 7200 внутриреспубликанских рейсов 77 автомобилями. На внутриреспубликанских рейсах у предприятия преобладают автомобили, которые совершают за полгода пробег менее 20 тыс. км.

Подводя итог, произошедшее сокращение рейсов и общего пробега повлекло за собой сокращение и других показателей выполнения перевозок. Уменьшение числа транспортных средств не поспособствовало увеличению среднего пробега. Возможно, на предприятии произошёл пересмотр маршрутов и работы с посредниками, из-за чего сократилось число рейсов и маршрутов. В целом, цепь поставок ОАО «Бабушкина крынка» хорошо налажена, включает в себя цепи разных видов сложности, что диверсифицирует их деятельность, и достаточно эффективно функционирует.

Поскольку явных проблем анализом не было выявлено, то следует рассмотреть скрытые угрозы: наличие порожних пробегов и простоев; недоиспользование грузоподъемности; устаревание подвижного состава; наличие

недостаточно рациональных маршрутов – и мероприятия по их устранению. Рассмотрим некоторые из мероприятий.

Применяя терминальный способ перевозки, предприятие могло бы:

- 1) интегрировать деятельность филиалов и управляющей компании;
- 2) консолидировать грузы из филиалов;
- 3) расширить сферу своего влияния;
- 4) увеличить использование грузоподъемности транспорта;
- 5) уменьшить общий пробег;

6) оперативно доставить товар в нужном количестве заказчику из терминала.

Помимо перечисленного, при применении терминальной перевозки в крупные города Брестской и Гродненской областей будет использовано меньшее количество топлива и времени водителя в рейсе, чем если это будет прямой кольцевой маршрут. ОАО «Бабушкина крынка» может данным способом осуществлять перевозку товарной группы с большим сроком хранения с промежуточным хранением на складе или без него.

Поиск более рационального маршрута возможен за счёт применения методов экономико-математического моделирования. Создание математической модели маршрута или цепочки поставок позволит не только получить представление о фактической конфигурации, но и даст возможность вносить различные изменения в них с учетом конкретной задачи. Конечной целью данного мероприятия является определение потенциальных возможностей оптимизации затрат компании. При этом грамотное проектирование цепи поставок должно быть направлено на обеспечение эффективности и оптимальности всей логистической системы в целом, а не отдельного ее элемента. Так, ОАО «Бабушкина крынка» может рассмотреть вариант доставки продукции в г. Орел не через Смоленск из Мстиславского филиала, а через Чаусский филиал из Быховского и/или Славгородского филиалов.

В целях повышения показателя выпуска на линию незадействованного в хозяйственной деятельности подвижного состава, а также для лучшего использования подвижного состава предприятиям следует обратиться к специализированным интернет-площадкам, на которых осуществляется поиск свободного и попутного транспорта и попутного груза. Помимо дополнительного дохода и консолидации груза, это мероприятие будет способствовать реализации практики Make or Buy Decision. Её реализация будет заключаться в том, что появится возможность для пересмотра необходимости сохранения числа транспортных единиц в собственном подвижном парке при возможности брать или сдавать их в аренду. Таким образом, специализированные интернет-площадки могут уменьшить потери одних предприятий, понесённые простоями и порожними пробегами подвижного состава, и ускорить процесс поиска подходящего подвижного состава другими предприятиями. Особенно актуально использование площадок при дальних рейсах, например из Орла в Могилев для ОАО «Бабушкина крынка».

УДК 339.178

## АНАЛИЗ КОНКУРЕНТНЫХ СИЛ В ЛЬНЯНОЙ ОТРАСЛИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ РУПТП «ОРШАНСКИЙ ЛЬНОКОМБИНАТ»

Е. И. ВИКТОРОВА, К. И. ДЕНИСОВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

РУПТП «Оршанский льнокомбинат» работает в отрасли производства льняных изделий, конкурируя с другими предприятиями благодаря огромному производству льняной продукции и продажам по всему миру.

Для оценки конкурентных сил в отрасли производства льняных изделий воспользуемся моделью М. Портера «Пять сил конкуренции» (табл. 1).

Табл. 1. Оценка конкурентных сил в отрасли и направления работы льнокомбината

Параметр	Значение	Описание	Направление работ
Угроза со стороны товаров-заменителей	Высокий (5 баллов)	Предприятие производит продукцию изо льна, однако на рынке существует огромное множество различных тканей-конкурентов	Продвижение льняной продукции и тканей среди населения и общества путем увеличения количества и качества рекламы, проведения рекламных акций, особенно в жаркие месяцы года
Угрозы внутри-отраслевой конкуренции	Низкий (1 балл)	Предприятие является лидером в странах СНГ по объемам производства льняной продукции	Снижение влияния ценовой конкуренции на продажи, поддержание высокого качества продукции
Угроза со стороны новых игроков	Низкий (1 балл)	Отсутствие появления новых игроков устраняет угрозу	Закрепление и сохранение лидерских позиций на мировом уровне
Угроза потери текущих клиентов	Средний (3 балла)	Широкий выбор альтернативных тканей может привести к потерям клиентов	Проведение акций для постоянных покупателей, разработка программы лояльности
Угроза нестабильности поставок	Низкий (1 балл)	Стабильность со стороны поставок гарантируется тем, что страна богата льном	Проведение переговоров о снижении цен

Таким образом, РУПТП «Оршанский льнокомбинат» является лидером по производству льняной продукции в Беларуси и странах СНГ. Предприятие выдерживает конкуренцию по всему миру благодаря собственным объемам производства различных видов продукции. Страна богата льном, что гарантирует производство продукции в больших объемах и надежность поставок сырья. Отсутствуют угрозы появления новых предприятий по производству льняных тканей. Льнокомбинату необходимо проводить мероприятия по сохранению постоянных клиентов, проводить рекламные акции для привлечения новых клиентов. Предприятие РУПТП «Оршанский льнокомбинат» является конкурентоспособным и готово соперничать с конкурентами в отрасли производства льняных изделий во всем мире.

УДК 339.178

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЮЗАБИЛИТИ САЙТОВ-КОНКУРЕНТОВ РУПТП «ОРШАНСКИЙ ЛЬНОКОМБИНАТ»

Е. И. ВИКТОРОВА, К. И. ДЕНИСОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одним из способов анализа конкурентоспособности предприятий является сравнительная оценка юзабилити сайтов-конкурентов. Данный метод поможет провести полный анализ сайтов по заданным критериям, в результате чего можно будет прийти к заключению.

В качестве конкурентов для РУПТП «Оршанский льнокомбинат» (сайт – linenmill.by) были выбраны сайты следующих предприятий:

- интернет-магазин «ИзоЛьна» (сайт – izolna.ru);
- ООО «Гаврилов-Ямский Ткач» (сайт – flaxfabric.ru).

Поскольку у бренда отсутствуют конкуренты на территории Беларуси, то анализ будет производиться относительно конкурентов на зарубежном рынке.

Для оценки юзабилити сайтов-конкурентов использовалась десятибалльная шкала, в которой 0 баллов означает отсутствие параметра, а 10 баллов соответствует наилучшему значению параметра.

Сравнительная оценка юзабилити сайтов РУПТП «Оршанский льнокомбинат» и его ближайших конкурентов представлена в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительная оценка юзабилити сайтов-конкурентов

Параметр	linenmill.by	izolna.ru	flaxfabric.ru
Выразительность визуализации продукта	7	10	4
Скорость загрузки	10	10	10
Подробное описание продукта	9	10	6
Корректно работающая навигация	10	10	8
Пространственная навигация	10	9	3
Целевой СТА	9	9	0
Дизайн сайта	9	10	1
Качество контента	9	9	2
Взаимодействие с аудиторией	4	10	0
Общая оценка	77	87	34

По данным таблицы можно сделать следующие выводы.

Сайтом-лидером является сайт izolna.ru, суммарный балл по всем параметрам составил 87. На данном сайте самый высокий уровень визуализации продукта, мгновенная загрузка и скорость перехода между категориями. Под каждым товаром находятся широкое описание товара и все его конструктивные особенности. Навигация и пространственная навигация работают абсолютно

корректно, являются доступными для каждого пользователя. Целевой СТА сайта предлагает огромное количество взаимодействий с пользователем, присутствует возможность провести сравнение нескольких товаров. Дизайн сайта является приятным для глаза. Контент сайта на высшем уровне, создается полное ощущение премиальности и качества. Для взаимодействия с аудиторией присутствует личный блог, список акций.

На втором месте расположился сайт linenmill.by, набравший 77 баллов. Отрыв от конкурента-лидера составляет 10 баллов. Выразительность визуализации продукта на высоком уровне. Скорость загрузки максимальная, открытие сайта занимает мгновение. Под каждым товаром есть подробное описание товара, также отображается количество оставшихся позиций. Навигация сайта абсолютно корректна, все категории товаров разбиты по группам, присутствуют ссылки на внешние источники и социальные сети. Целевой СТА сайта на высоком уровне, присутствует возможность пройти различные анкеты оценки качества услуг. Дизайн сайта приятен, однако дизайн сайта-лидера является немного более привлекательным. Качество контента также на высоком уровне. Практически отсутствует взаимодействие с аудиторией.

На последнем месте расположился сайт flaxfabric.ru, набравший 34 балла. Количество баллов в 2 раза меньше, чем у первого сайта. Выразительность визуализации контента на низком уровне. Скорость загрузки высокая. Описание продукта недостаточно полное. Навигация сайта простая, доступная. Целевой СТА отсутствует. Дизайн сайта не приятен глазу, вызывает отвращение. Контента минимальное количество. Взаимодействие с аудиторией вовсе отсутствует.

Для повышения юзабилити сайта РУПТП «Оршанский льнокомбинат» стоит провести ряд действий:

- повысить качество визуализации продукта путем загрузки фотографий в формате png, что приведет к минимализации потерь качества изображений товара;
- добавить возможность оставлять отзывы для зарегистрированных на сайте покупателей;
- добавить возможность проведения сравнения товаров для сравнения пользователем описания товара;
- добавить корзину товаров;
- разработать личный онлайн-блог, в котором будут проходить различные активности, реклама новых позиций товара;
- разработать отдельный отдел, содержащий перечень акционных товаров/позиций;
- добавить онлайн-поддержку путем введения на сайт онлайн-консультанта;
- организовать чат-бот;
- улучшить дизайн сайта, сделать его более привлекательным и детализированным.

УДК 332.1:656.0

## ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

М. Н. ГРИНЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Транспортная система – это важный элемент социально-экономического развития региона. Вклад вида деятельности «Т» (транспортная деятельность, складирование, почтовая и курьерская деятельность) в экономику региона можно оценить через влияние на величину ВРП (валового регионального продукта). Он зависит от количества организаций и индивидуальных предпринимателей, занятого населения, инвестиций в основной капитал, поступления иностранных инвестиций, стоимости рабочей силы.

В последние годы работа транспорта осуществляется в сложных экономических условиях (COVID-19, изменение рынков предоставления услуг).

Оценка развития региональной транспортной системы может проводиться с использованием нескольких блоков показателей:

– показатели перевозочной работы. Чаще всего используются объем перевозок и грузооборот;

– показатели густоты путей сообщения. Среди них показатели Энгеля, Гольца, Румянцевой.

Предлагается для более всесторонней оценки вклада вида деятельности «Т» в экономику региона использовать еще один блок показателей: показатели активности и возможности.

Показатель активности (транспортоемкость) можно определить как отношение уровня развития вида деятельности «Т» к уровню развития региона.

Уровень развития вида деятельности находится как отношение показателя транспорта региона к показателю транспорта страны, а уровень развития региона характеризуется вкладом региона в экономику страны, т. е. делением определенного показателя по региону на показатель в целом по стране.

Показатель возможности (транспортотдача) рассчитывается делением уровня использования по региону на уровень использования по виду деятельности «Т».

Уровень использования вида деятельности определяется как отношение показателя транспорта региона к показателю региона в целом, а уровень использования региона находится как вклад вида деятельности в общий показатель по стране.

Применение предложенной системы показателей позволит дать всестороннюю оценку развития транспортного комплекса региона и разработать меры по увеличению вклада вида деятельности «Т» в экономику региона.

УДК 656.0

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА МОГИЛЕВСКОЙ ОБЛАСТИ

М. Н. ГРИНЕВИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В последние годы значительные перемены произошли в условиях транспортной деятельности, что подтверждается рядом показателей (табл. 1).

Табл. 1. Вклад вида деятельности в экономику страны

Показатель	2019 г.	2022 г.
Удельный вес в ВВП, %	5,7	5,0
Занятое население, %	6,8	6,7
Инвестиции в основной капитал, %	9,5	5,9
Поступление иностранных инвестиций, %	19,5	16,3

Как видно из табл. 1, имеет место снижение ряда ключевых параметров, характеризующих развитие транспорта.

Транспорт региона оказывает значительное влияние на социально-экономические показатели Могилевской области. Его вклад в валовую добавленную стоимость составляет более 4 %. Около 6 % занятого населения работает на транспорте. Почти 10 % инвестиций в основной капитал приходится на транспорт. Нормальную его работу обеспечивает наличие железных дорог (более 800 км) и автомобильных дорог с твердым покрытием (свыше 11, 5 тыс. км).

Работу транспорта можно охарактеризовать рядом частных показателей: грузооборот, пассажирооборот, объем перевозок пассажиров. За 2017–2022 гг. грузооборот достигал наибольших величин в 2020 г. и 2021 г., а далее имеет место тенденция к снижению данного показателя. Пассажирооборот минимальных значений достигал в 2021 г. и 2022 г., а с 2023 г. наметился рост показателя. Также имеет место явно выраженная тенденция снижения количества перевезенных пассажиров.

Среди тенденций развития транспорта Могилевской области можно выделить следующие:

- совместное развитие частных предприятий и предприятий с долей государства в имуществе;
- координация работы железнодорожного и автомобильного транспорта при перевозках разных грузов и категорий населения;
- создание системы транспортного обслуживания населения с привлечением предприятий разных форм собственности и видов транспорта;
- привлечение инвестиций и обновление подвижного состава;
- снижение объемов грузовых перевозок и развитие конкуренции на грузовом автомобильном транспорте;
- расширение привлечения электротранспорта к выполнению перевозок пассажиров.



УДК 330.341:005.591.6

## ИННОВАЦИИ – ПУТЬ К ЭФФЕКТИВНОМУ ИНТЕНСИВНОМУ ЭКОНОМИЧЕСКОМУ РАЗВИТИЮ

Н. С. ЖЕЛТОК

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Вопросы перевода Республики Беларусь на путь интенсивного инновационного развития – это вопросы выживания и национальной безопасности. Поэтому отправным пунктом для стимулирования инновационного развития должна стать национальная инновационная система, которая смогла бы объединить интересы государства и предпринимательской среды. Став на путь концентрации и консолидации ресурсов, можно обеспечить наращивание технологического потенциала страны. В процессе наращивания технологического потенциала приоритет в экономике должен быть отдан производству новых знаний и инновационных идей. Экономика, построенная на знаниях, становится значимым фактором и важнейшим условием интеллектуального потенциала. Накапливая интеллектуальный потенциал, предприятия будут создавать высокую добавленную стоимость. Такой подход необходим для создания задела будущих достижений, сохранения научных школ, создания устойчивых социальных мотиваций. Это позволит выработать механизм разработки и производства конкурентоспособной наукоемкой продукции. Этому будет способствовать 2024 г., который объявлен годом качества, в основу которого надо положить объективную инвентаризацию научного потенциала страны, в том числе развитие малого предпринимательства в научно-технической сфере. Чтобы экономика была конкурентоспособной, государству самому надо освоить функцию развития, которая должна включать обеспечение всеобщей доступности инновационных знаний, создание системы услуг для инновационного предпринимательства. Если не разработать политику поддержки инновационной активности, республика может потерять интеллектуальный потенциал.

Необходимо продумать меры для инновационного управления как на государственном уровне, так и в бизнес-секторе. Особое внимание со стороны государства требует повышение уровня высшего образования, чтобы специалист, наряду с фундаментальным образованием, знал практику управления инновационной деятельностью. Если этого не сделать сейчас, то со временем это может вылиться в проблему низкого качества специалистов.

В белорусском обществе должно прочно утвердиться представление о том, что создание и поддержание инновационной активности – один из приоритетов государства и общества в целом. В этом направлении необходимо совершенствовать законодательную базу, чтобы она выполняла инновационную функцию.

УДК 339.178

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ КОНДИТЕРСКИХ БРЕНДОВ В СОЦИАЛЬНЫХ МЕДИА

Н. С. ЖЕЛТОК, М. А. ЗВЕРЕВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

ОАО «Красный пищевик» – одна из крупнейших кондитерских фабрик Республики Беларусь, второй по объёму производства производитель зефирно-мармеладной продукции в странах СНГ.

Основными конкурентами предприятия являются СП ОАО «Спартак» (г. Гомель), СОАО «Коммунарка» (г. Минск), СООО «Первая шоколадная компания» (г. Брест), ОАО «Красный мозырянин» (г. Мозырь), Кондитерское объединение «Славянка» (г. Старый Оскол), Кондитерский концерн «Бабаевский» (г. Москва), АО «Красный октябрь» (г. Москва).

Оценка активности бренда «Красный пищевик» и его конкурентов в социальных медиа представлена в табл. 1, при этом использовалась пятибалльная шкала, в которой 0 означает отсутствие бренда в данной социальной сети, 5 – присутствие, высокую активность и качество контента.

Табл. 1. Сравнительная оценка активности брендов в социальных медиа

Бренд	VK	OK	Instagram	TikTok	Facebook	YouTube
«Красный пищевик»	4	4	4	5	4	3
«Спартак»	5	5	5	4	5	5
«Коммунарка»	5	4	5	5	4	3
«Первая шоколадная компания»	0	0	1	0	0	0
«Красный мозырянин»	2	2	5	5	3	3
«Славянка»	4	4	0	2	3	1
«Бабаевский»	2	2	0	0	3	0
«Красный октябрь»	1	1	1	0	0	0

По результатам исследования ОАО «Красный пищевик» входит в тройку лидеров по активности в социальных медиа. Однако рекомендуется увеличить частоту публикаций в таких социальных сетях, как VK, OK, Instagram. Также стоит отметить, что платформы VK и OK позволяют размещать таргетированную рекламу, которая является отличным средством для продвижения бренда. Второй рекомендацией является активное ведение блога в YouTube. Недавно на данной платформе появились видео формата Shorts, которые стремительно набирают популярность. Третья рекомендация – стимулирование обсуждений под публикациями. К примеру, задавать вопросы аудитории про новые продукты, линейки вкусов. Это не только значительно увеличит активность на официальных страницах предприятия, но и сформирует «Диалоговую площадку», с помощью которой можно узнать мнение потребителей о продукте.

УДК 330.336

## ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ

Е. С. ЖЕСТКОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Для многокритериального оценивания цифрового потенциала организации следует построить иерархию частных показателей, на основе которых будет сформирован интегральный показатель оценки цифрового потенциала.

Можно выделить следующие частные показатели: уровень автоматизации процессов, отдача от инвестиций в цифровизацию, доход от цифровых услуг, научно-информационные ресурсы; наличие кадров, способных использовать новые технологии, отношение коллектива к цифровым нововведениям; качество обслуживания клиентов, объем онлайн-продаж; уровень конкуренции, устойчивость бизнеса, инновационная продукция.

Для описания частных критериев удобно использовать функции принадлежности (ФП), вид которых задается экспертами.

Уровень автоматизации процессов задается как процент автоматизированных процессов в общем их количестве. Пример ФП представлен на рис. 1, а.

Отдача от инвестиций в цифровизацию оценивается с помощью индекса рентабельности. ФП представлена на рис. 1, б.

Доход от цифровых услуг оценивается в стоимостном выражении. Организация задает определенную минимальную сумму такого дохода. Пример ФП представлен на рис. 1, в.

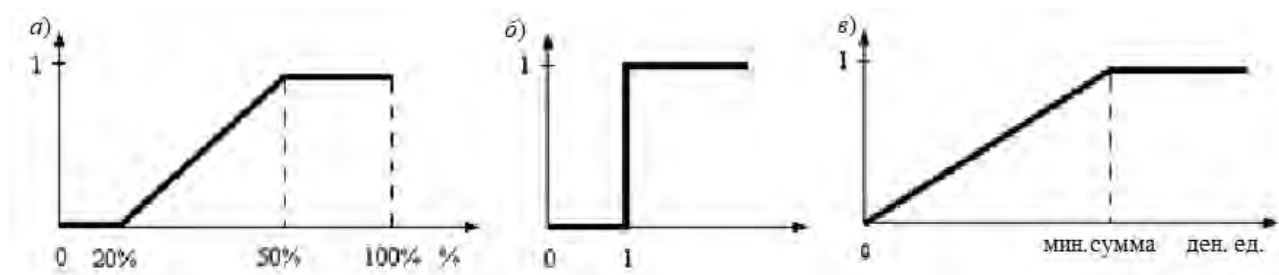


Рис. 1. Формализация критериев цифровой трансформации организации

Научно-информационные ресурсы – это ПО, которое используется в организации. Функция принадлежности задается дискретно (табл. 1).

Табл. 1. Оценка цифрового потенциала предприятия

Используемое ПО	Значение ФП
Нет специализированного ПО	0,1
Специализированное ПО или облачные технологии	0,5
Специализированное ПО или облачные технологии взаимодействуют с внешними контрагентами	0,8
Используется единая система управления (ERP-система)	1

Наличие кадров, способных использовать новые технологии, оценивается процентом таких сотрудников в общем их числе. Пример ФП представлен на рис. 2, а.

Отношение коллектива к цифровым нововведениям оценивается по 9-балльной шкале по результатам опроса сотрудников. При этом можно использовать вербальные оценки: негативное отношение, нейтральное, положительное и т. п. ФП приведена на рис. 2, б.

Качество обслуживания клиентов описывается процентом клиентов, недовольных обслуживанием. Пример ФП представлен на рис. 2, в.

Онлайн-продажи оцениваются как их процент в общей сумме продаж. Пример ФП приведен на рис. 2, г.

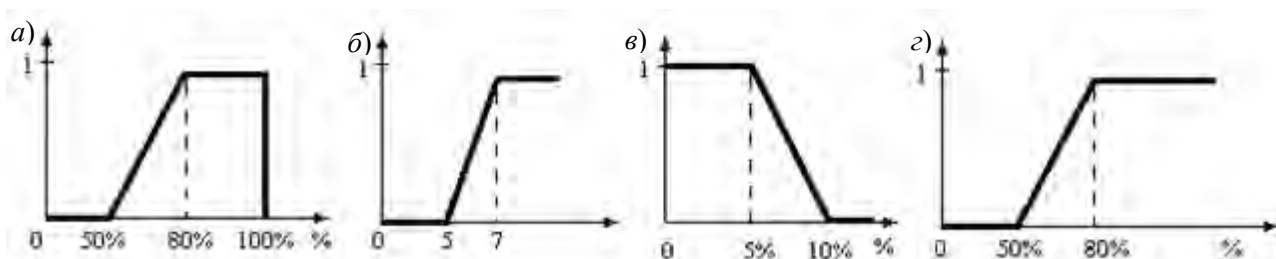


Рис. 2. Формализация критериев «Кадры» и «Работа с клиентами»

Уровень конкуренции зависит от числа основных конкурентов. Большое число конкурентов подталкивает компанию к внедрению цифровых технологий для сохранения конкурентных позиций. Вид ФП представлен на рис. 3, а.

Инновационная продукция оценивается как процент такой продукции в общем выпуске. Пример ФП приведен на рис. 3, б.

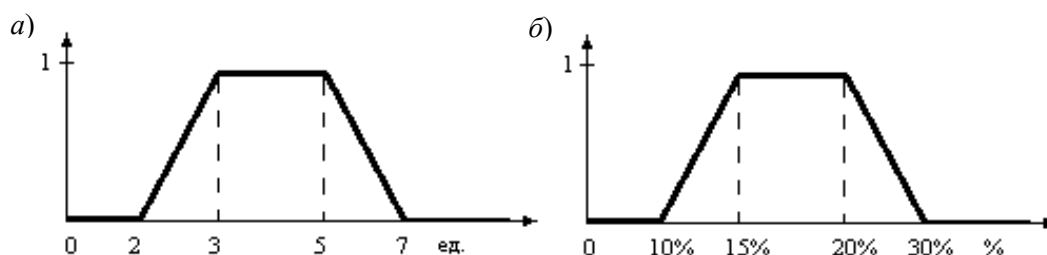


Рис. 3. Формализация критериев бизнес-среды

Устойчивость бизнеса можно оценить по финансовому состоянию предприятия. ФП задается дискретно, пример представлен в табл. 2.

Табл. 2. Оценка финансового состояния предприятия

Вид финансового состояния	Значение ФП
Кризисное	0,1
Неустойчивое	0,4
Устойчивое	0,7
Абсолютно устойчивое	1

УДК 004.031

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕНЕЖНЫХ ПОТОКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Ю. А. ЗВЯГИНЦЕВА, И. В. КУЗНЕЦОВА

Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина  
Орел, Россия

Основной проблемой сельскохозяйственных предприятий, как и российской экономики в целом, является недостаточность денежных средств для осуществления своей операционной (текущей) и инвестиционной деятельности. Одной из причин этого дефицита является, как правило, низкая результативность привлечения и использования денежных ресурсов.

В современном мире, особенно в условиях экономической нестабильности и финансовых рисков, планирование денежных потоков является ключевым инструментом успешного управления сельскохозяйственными организациями. От умелого планирования зависит как эффективность использования имеющихся финансовых ресурсов, так и возможность оперативной реакции на изменения внешних условий.

Однако в связи с особенностями деятельности сельскохозяйственных предприятий планирование денежных потоков требует специального подхода. Применение общепринятых методик и моделей может быть недостаточно эффективным.

Планирование денежных потоков является одним из ключевых инструментов финансового менеджмента в сельскохозяйственных организациях. Этот процесс позволяет эффективно управлять деньгами, определять объемы доходов и расходов, а также прогнозировать будущие финансовые результаты.

Одной из особенностей планирования денежных потоков в сельскохозяйственной организации является необходимость учета специфики отрасли. Аграрные предприятия часто сталкиваются с нестабильными рыночными условиями, зависимостью от природных факторов и возможностью возникновения непредвиденных затрат. Поэтому точное и своевременное планирование денежных потоков поможет минимизировать риски и обеспечить финансовую устойчивость.

Планирование денежных потоков является важной составляющей финансовой деятельности любой сельскохозяйственной организации. В современных условиях, когда экономическая обстановка постоянно меняется, необходимо учитывать различные факторы, которые могут повлиять на планирование денежных потоков в данной отрасли.

Один из основных факторов, влияющих на планирование денежных потоков в сельскохозяйственной организации, – это колебания цен на продукцию. Цены

на сельскохозяйственную продукцию могут изменяться под воздействием различных факторов: спроса и предложения на рынке, изменений климатических условий, политических решений и других экономических и социально-политических событий. При планировании денежных потоков необходимо учитывать возможные колебания цен и адаптироваться к ним.

Еще один фактор, который следует учесть при планировании денежных потоков в сельскохозяйственной организации, – это изменение затрат. Затраты на производство сельскохозяйственной продукции могут меняться в зависимости от таких факторов, как цены на топливо и энергию, стоимость семян и удобрений, зарплаты работников и другие операционные расходы. При составлении плана денежных потоков необходимо учесть возможное изменение затрат и принять соответствующие меры для минимизации негативного влияния на финансовое положение организации.

Также следует обратить внимание на фактор риска при планировании денежных потоков. Сельское хозяйство подвержено различным рискам, таким как климатические катастрофы (засуха или наводнения), болезни животных или растений, изменения законодательства и технического регулирования. В случае возникновения данных рисков может возникнуть необходимость пересмотреть план денежных потоков и предусмотреть возможные сценарии развития событий.

Еще одним фактором, который стоит учитывать при планировании денежных потоков в сельскохозяйственной организации, является доступность финансирования. Сельскохозяйственные предприятия могут столкнуться с проблемой доступности кредитов и заемных средств для своей деятельности. При планировании денежных потоков следует учесть возможное отсутствие или ограничение доступа к финансированию, а также разработать стратегии по привлечению дополнительного капитала.

Наконец, необходимо учитывать влияние государственной политики на планирование денежных потоков в сельскохозяйственной организации. Государство может определять различные программы поддержки аграрного сектора, такие как выделение субсидий или льготных условий для получения кредитов. При формировании плана денежных потоков следует учитывать возможное изменение государственной политики и использовать имеющиеся меры поддержки.

Таким образом, при планировании денежных потоков в сельскохозяйственной организации необходимо учитывать различные факторы, которые могут повлиять на финансовое положение и результаты деятельности. Колебания цен на продукцию, изменение затрат, риски, доступность финансирования и государственная политика – все эти факторы необходимо анализировать и учитывать при составлении плана денежных потоков в сельском хозяйстве. Только так можно обеспечить стабильность и успешное развитие организации в современных условиях.

УДК 338.24:004.41/42

## ПРОБЛЕМЫ БУХГАЛТЕРСКОГО УЧЕТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ БАНКОВ

А. С. ЗУБКОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Банковские мобильные приложения с каждым годом набирают все большее распространение. В настоящее время банки предлагают мобильные приложения не только для физических, но и для юридических лиц. Использование приложений позволяет организациям – клиентам банков совершать различные операции без привязки к рабочему месту, где находится компьютер с определенным программным обеспечением и флешкой с электронной цифровой подписью (ЭЦП).

Масштаб возможностей приложений, предлагаемых банками, различен в разных организациях. Основные функциональные возможности мобильных приложений для юридических лиц: информация о состоянии счетов; совершение платежей; перевод зарплаты сотрудникам; купля/продажа валюты; формирование выписки по счету; выставление платежных требований; создание заявлений на акцепт.

Кроме этого, большинство приложений белорусских банков позволяют клиентам подключать услуги по информированию (СМС- и/или PUSH-уведомления). В некоторых банках для полноценного использования всех возможностей приложения потребуется отдельная SIM-карта с установленным криптоключом (например, в приложении Банка ВТБ). Если такая карта отсутствует – клиенту доступен только просмотр остатков денежных средств по счету. Во многом это определяется политикой безопасности, принятой в том или ином банке.

Однако дополнительные возможности мобильных приложений несут с собой некоторые риски и проблемы с бухгалтерским учетом.

Первой из этих проблем является оформление первичных учетных документов по каждой совершенной в мобильном приложении операции. Согласно п. 1 статьи Закона РБ «О бухгалтерском учете и отчетности» [1], «хозяйственные операции подлежат оформлению первичными учетными документами». При использовании мобильных приложений это касается операций, при которых происходило реальное движение денежных средств: перевод средств контрагентам; перевод заработной платы сотрудникам; купля/продажа валюты и др. При совершении каждой из этих операций банк присылает на мобильное устройство отчет об операции по счету, в частности чек об оплате или переводе. Однако данные операции необходимо отразить в компьютерной системе бухгалтерского учёта, принятой в организации (например, в системе 1С Бухгалтерия). Для этого бухгалтеру необходимо оформить положенные в таких случаях первичные учетные документы (ПУД) (платёжное поручение, платежное требование, заявка на покупку или продажу валюты и др.). Данные документы

необходимо сформировать и ввести в автоматизированную систему учёта, применяемую в организации. Они являются основанием для совершения операции. Кроме того, в эту же компьютерную систему учёта необходимо ввести полученный от банка на мобильное устройство отчёт о совершённой хозяйственной операции. Для этого должна быть налажена и отработана техническая возможность такого перемещения, учитывая, что на смартфонах и компьютерах используются разные операционные системы. Далее на основании отчёта банка бухгалтеру необходимо единолично составить первичный учетный документ о совершённой операции.

Допустимые случаи и возможности такого единоличного оформления установлены соответствующим постановлением Министерства финансов Республики Беларусь [2]. Согласно п. 1 данного постановления, первичный учетный документ, подтверждающий совершение хозяйственной операции, может быть составлен участником хозяйственной операции единолично в случае выполнения работ (оказания услуг) по публичному договору, заключенному подрядчиком (исполнителем) и заказчиком в письменной форме, в котором предусмотрено оформление первичных учетных документов, подтверждающих выполнение работ (оказание услуг), единолично. Мобильный банкинг, очевидно, относится к числу публичных договоров, однако он не заключается в письменной форме, вследствие чего в нем не может быть предусмотрено оформление ПУД единолично.

Таким образом, складывается ситуация, при которой требование закона о необходимости составления ПУД по каждой операции в случае с мобильным банкингом не может быть выполнено, т. к. составить его единолично не позволяют требования закона, а составить ПУД с участием двух сторон не представляется возможным.

Для устранения данной проблемы необходимо внести изменения в нормативные документы, в частности в постановление Минфина РБ от 21.12.2018 г. № 58, на основании которых организации – пользователи мобильного банкинга получали бы возможность единоличного составления первичных учетных документов по совершённым операциям.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О бухгалтерском учете и отчетности [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 12 июля 2013 г., № 57-3 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2024. – Режим доступа: [http //www.pravo.by](http://www.pravo.by).
2. О единоличном составлении первичных учетных документов [Электронный ресурс]: постановление М-ва финансов Респ. Беларусь, 12 февр. 2018 г., № 13 (с изм. и доп.) // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2024. – Режим доступа: [http //www.pravo.by](http://www.pravo.by).



УДК 338.24

## ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА

А. В. КАЗАНСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В гл. 6 Подпрограммы 1 «Республиканские автомобильные дороги» «Государственной программы Дороги Беларуси на 2021–2025 годы» (далее – Программы) отмечено, что не соответствует нормативным требованиям 35,4 % республиканских автомобильных дорог, дефекты покрытия имеют 23,6 %, на 12,4 % республиканских дорог несущая способность дорожного покрытия до 6 т на ось, 24,2 % мостовых сооружений не соответствуют нормативным требованиям по грузоподъемности или габариту. Вызывает обеспокоенность динамика производства работ: по сравнению с 2008 г., в 2020 г. в 15,4 раза сократилась протяженность капитально отремонтированных республиканских автомобильных дорог и в 3,3 раза – протяженность дорог, на которых произведен текущий ремонт. Недостаточное финансирование республиканских автомобильных дорог приводит к экономическим издержкам пользователей: транспортных организаций, предприятий и домашних хозяйств.

С целью анализа тенденций в развитии механизма финансирования Республиканского дорожного фонда (далее – Фонда) в табл. 1 приводим данные из республиканских программ и законов о республиканском бюджете Республики Беларусь.

Табл. 1. Финансирование дорожного хозяйства

Год	Подпрограмма 1 Программы Дороги Беларуси			Закон о бюджете		
	Доходы Фонда, млн р.	Дополнительно направлено в Фонд, млн р.	Расходы Фонда, млн р.	Доходы Фонда, млн р.	Дополнительно направлено в Фонд, млн р.	Расходы Фонда, млн р.
2020	603,197	643,318	1 246,515	616,370	5,904	622,274
2024	840,249	745,721	1 585,970	811,685	945,905	1 757,590

В Законе «О бюджете Республики Беларусь на 2020 год» финансирование республиканского дорожного хозяйства было предусмотрено в размере 3,04 % от расходной части бюджета. Причем на капитальный ремонт автомобильных

дорог было выделено 45,0 млн р., что составляет 7,23 % от расходов Фонда, на текущий ремонт – 105,15 млн р. (16,90 %).

В законе о бюджете на 2024 г. запланированы доходы Фонда в размере 811,685 млн р., что составляет 1,8 % от расходной части республиканского бюджета (44 657,435 млн р.). Помимо доходов Фонда, на финансирование Подпрограммы 1 «Республиканские автомобильные дороги» направляется 945,905 млн р. из средств республиканского бюджета, соответственно, общий размер финансирования Фонда составляет 1 757,590 млн р. (4,35 % от расходной части республиканского бюджета). При этом предполагается выделить на капитальный ремонт – 7,91 %, на текущий ремонт дорог – 31,09 % от расходов Фонда. Доходы Фонда в 2024 г. в общем объеме финансирования расходов составляют 46,18 %, что значительно ниже, чем было ранее в 2020 г. – 99 %. Сопоставляя вышеприведенные данные из законов о бюджете Республики Беларусь с данными Подпрограммы 1 на 2021–2025 гг., необходимо отметить, что фактические доходы Фонда в 2024 г., относительно 2020 г., увеличились на 31,69 %, а весь объем финансирования, предусмотренный бюджетом на 2024 г., увеличился до 182,45 %. Объем финансирования, предусмотренный республиканским бюджетом на 2024 г., увеличен относительно объема финансирования, предусмотренного Программой на 2021–2025 гг., на 10,82 %. Финансирование капитального и текущего ремонта в 2024 г. планировалось Программой на 2021–2025 гг. в размере 167,00 и 200,00 млн р. соответственно, в законе о бюджете на 2024 г. они определены в размере 139,171 и 560,828 млн р.

Программой планировалось значительное увеличение объемов финансирования капитального ремонта дорог с 67,160 млн р. в 2021 г. до 167,00 млн р. в 2024 г. в текущих ценах, однако в бюджете на 2024 г. эта сумма определена в размере 139,171 млн р.

#### Выводы.

1. Дополнительные средства, выделяемые из государственного бюджета, стали основным источником финансирования республиканских автомобильных дорог, доходы Республиканского дорожного фонда составляют в общем объеме финансирования расходов только 46,18 %.

2. Основные традиционные источники пополнения Фонда: транспортный налог, плата за проезд по платным дорогам и плата за оформление разрешений на проезд для иностранных пользователей не позволяют аккумулировать достаточно средств для развития дорожного хозяйства.

3. В 2024 г. значительно увеличен объем финансирования текущих ремонтов республиканских дорог, имеется тенденция увеличения объемов проведения капитальных ремонтов дорог, однако она не столь явная.

## АВС-АНАЛИЗ УСЛУГ МОГИЛЕВГРУЗСЕРВИС

Л. А. КЛИМОВА, К. В. ХРЕБТОВИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

АВС-анализ является эффективным инструментом для анализа услуг предприятия. Он позволяет классифицировать услуги по степени их значимости для организации и выделить наиболее значимые для дальнейшего анализа. В результате проведения анализа можно определить, какие услуги необходимо улучшать и развивать, чтобы повысить эффективность предприятия.

АВС-анализ основных услуг обособленного структурного подразделения транспортного РУП «Могилевское отделение Белорусской железной дороги» «Могилевгрузсервис» (далее – Могилевгрузсервис) представлен в табл. 1.

Табл. 1. АВС-анализ основных услуг Могилевгрузсервис

Услуга	Объем продаж, р.	Кумулятивный объем продаж, р.	Кумулятивный удельный вес, %	Группа
Транспортная обработка грузов	9836156,9	9836156,9	87,496	А
Складирование и хранение	1112928,7	10949085,5	97,396	В
Ремонт машин и оборудования	199393,1	11148478,6	99,169	С
Аренда и деятельность грузового автомобильного транспорта	92311,9	11240790,5	99,990	С
Производство прочих готовых металлических изделий, не включенных в другие группировки	538,9	11241329,4	99,995	С
Производство деревянных строительных конструкций и столярных изделий, кроме сборных зданий	529,5	11241858,8	100,000	С
Итого	11241858,8	–	–	–

По полученным расчетам можно установить, что к группе А относятся наиболее доходные для Могилевгрузсервис услуги по транспортной обработке грузов, объем продаж которых составляет 9836156,9 р. или 87,496 %. К группе В относятся услуги по складированию и хранению, требующие текущего наблюдения и контроля. К группе С относятся все остальные виды услуг, их суммарный объем производства составляет 292773,3 р., а удельный вес в общем объеме производства равен 2,604 %. Это наименее важная группа, за ней необходимо осуществлять эпизодический контроль и учет. Вместе с тем в этой группе находятся перспективные для дальнейшего наращивания объемов продаж услуги по предоставлению в аренду и деятельности грузового автотранспорта. Основными мероприятиями в этом направлении могут стать разработка лендинга, создание групп в социальных медиа, использование современных медиаканалов и инструментов интернет-рекламы для продвижения.

УДК 339.178

## СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОРТФЕЛЯ УСЛУГ ПРЕДПРИЯТИЯ

Л. А. КЛИМОВА, К. В. ХРЕБТОВИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

БКГ-анализ относится к методам стратегического анализа, который позволяет оценить портфель продуктов или услуг компании и выделить те из них, которые приносят наибольшую прибыль и имеют потенциал для дальнейшего развития. Данный анализ поможет определить, какие услуги являются наиболее прибыльными и перспективными для компании, а также выявить те направления, которые нуждаются в дополнительном развитии или пересмотре для удовлетворения потребностей клиентов и обеспечения конкурентных преимуществ.

Цель проведения БКГ-анализа для предприятия заключается в выявлении услуг, которые имеют наибольшее влияние на результативность бизнес-процессов, а следовательно, на достижение стратегических целей. Этот анализ позволяет предприятию сконцентрировать усилия и ресурсы на наиболее важных аспектах своей деятельности, улучшая качество услуг и повышая уровень удовлетворенности клиентов.

Согласно данным табл. 1, распределим услуги Могилевгрузсервис в матрице (рис. 1).

Табл. 1. Исходные данные для построения матрицы

Услуга	Номер на рис. 1	Объем продаж, р.		Темп роста, %	Удельный вес в 2023 г., %
		2022 г.	2023 г.		
Транспортная обработка грузов	1	7736372,6	9836156,9	127,142	87,496
Складирование и хранение	2	1630941,5	1112928,7	68,238	9,900
Ремонт машин и оборудования	3	178884,6	199393,1	111,465	1,774
Деятельность грузового автомобильного транспорта	4	29015,4	92311,9	318,148	0,821
Производство прочих готовых металлических изделий, не включенных в другие группировки	5	534,9	538,9	100,738	0,005
Производство деревянных строительных конструкций и столярных изделий, кроме сборных зданий	6	405,8	529,5	130,460	0,005
Среднее значение	–	–	–	142,699	16,667

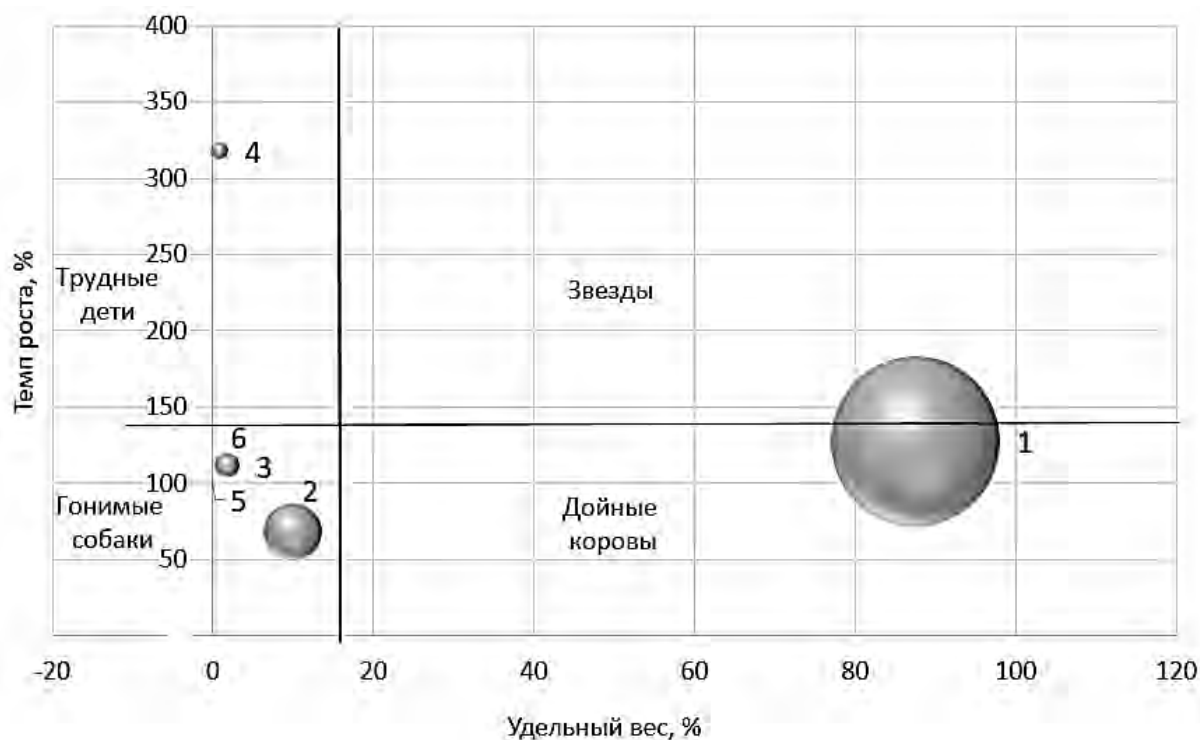


Рис. 1. Матрица БКГ-анализа Могилевгрузсервис

По рисунку можно сказать, что портфель услуг не является сбалансированным.

К «дойным коровам» относится транспортная обработка грузов, что занимает более 87 % всего объема продаж, что позволяет предприятию накапливать достаточно средств для инвестирования в развитие. Эту услугу необходимо развивать и улучшать, чтобы сохранить конкурентное преимущество.

К «звездам» не относится ни одна из перечисленных услуг.

К категории «трудные дети» относится деятельность грузового автомобильного транспорта. Характеризуется высоким темпом роста, но незначительным удельным весом. Необходимо разработать мероприятия по увеличению удельного веса за счет уменьшения удельного веса услуг следующей группы, чтобы избежать потери клиентов и снижения прибыли.

К категории «гонимые собаки» относятся складирование и хранение, ремонт машин и оборудования, производство прочих готовых металлических изделий, не включенных в другие группировки, производство деревянных строительных конструкций и столярных изделий, кроме сборных зданий. Необходимо проанализировать причины отсутствия спроса и принять меры для улучшения ситуации. Отказываться от них не стоит, т. к. они позволяют предприятию предлагать расширенный ассортимент услуг, следует изучить возможность сокращения затрат на их оказание.

Для всех групп необходимо использовать стратегию улучшения качества услуг предприятия и повышения удовлетворенности клиентов, которая будет включать в себя обучение сотрудников, разработку системы мотивации, внедрение новых технологий, улучшение системы обратной связи с клиентами.

УДК 338

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

С. Л. КОМАРОВА, М. Д. САКОВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Для каждого высшего учебного заведения необходимо оценивать свои конкурентные позиции для того, чтобы выявлять преимущества и недостатки образовательных продуктов и услуг, а также разрабатывать эффективные стратегии развития вуза на рынке образовательных услуг. Оценка конкурентных позиций Белорусско-Российского университета на рынке образовательных услуг проводилась в рамках исследования по различным направлениям.

Конкурировать со столичными вузами, такими как Белорусский государственный университет, Белорусский государственный технический университет, БГЭУ, БГУИР, достаточно сложно, но на рынке региональных вузов, в частности Могилёвской области, Белорусско-Российский университет показал заслуженно высокие результаты. В исследовании участвовали учреждения образования, имеющие сходные профильные специальности (инженерные, экономические), в частности Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилёвский государственный университет имени А. А. Кулешова и Белорусско-Российский университет (далее – БРУ). Оценка конкурентоспособности проводилась методом Харрингтона с использованием функции принадлежности и представлена в табл. 1.

Табл. 1. Расчет показателей конкурентоспособности вузов Могилевской области

Учреждение ВО	$\mu_{соц}^j$	$\mu_n^j$	$\mu_{эк}^j$	$\mu_{общ}$
БРУ	0,72238	0,61606	0,27864	0,12400
МГУ им. А. А. Кулешова	0,65899	0,35745	0,34506	0,08128
МГУП	0,09985	0,17381	0,35845	0,00622

В рамках исследования также была проведена оценка конкурентных позиций Белорусско-Российского университета среди профильных региональных вузов Могилевской, Гомельской и Витебской областей, причем данному исследованию предшествовало анкетирование абитуриентов и первокурсников с целью выявления основных критериев по выбору региональных вузов. Исследования показали также высокие позиции БРУ на рынке, причем серьезную конкуренцию составляет только Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Исследования на приграничном рынке образовательных услуг также показали высокие позиции Белорусско-Российского университета. В качестве базы были выбраны вузы Могилевской, Гомельской, Витебской областей



УДК 366.1

## ОБЩЕСТВО ПОТРЕБЛЕНИЯ КАК БАЗИС РАСШИРЕННОГО ВОСПРОИЗВОДСТВА БИЗНЕС-СТРУКТУР

Е. А. КОСТЮКЕВИЧ

Барановичский государственный университет  
Барановичи, Беларусь

Эффективное развитие промышленных предприятий любых сфер деятельности на инновационной основе возможно только при достаточном уровне расширенного воспроизводства. Одним из существенных факторов, лежащих в основе расширенного производства, является значительный постоянный рост потребления всевозможных товаров и услуг. А этому, в свою очередь, способствует активное развитие общества потребления.

Впервые термин «общество потребления» использовал немецкий социолог и психолог Э. Фромм в 60-х гг. XX в.: «совокупность общественных отношений, которые организованы на основе принципа индивидуального потребления» [1].

Ж. Бодрийяр в своей книге «Общество потребления: его мифы и структуры» в 1970 г. дал следующую трактовку: «общество потребления – это общество самообмана, где невозможны ни подлинные чувства, ни культура, и где даже изобилие является следствием тщательно маскируемого и защищаемого дефицита, имеющего смысл структурного закона выживания современного мира». Здесь же он отметил: «В современной цивилизации не существует рационального потребителя, самостоятельно осуществляющего свой выбор. Индивидуальный, продиктованный реальными потребностями выбор иллюзорен – он продиктован самой структурой общества потребления, придающей значение не предметам, а абстрактным ценностям, тождественным отчужденным от них знакам. Потребности производятся вместе с товарами, которые их удовлетворяют. В основе выбора товара лежит стремление к социальному отличию, и, поскольку поддержка таких отличий есть жизненное условие существования современной цивилизации, потребность всегда остается неудовлетворенной» [2].

Общество потребления может быть рассмотрено с двух позиций.

1. С точки зрения потребителя – широкий ассортимент производимых товаров, свобода выбора, легкая доступность любых товаров.

2. С точки зрения производителя – управление мнением (поведением) потребителя (с помощью маркетинговых инструментов, через влиятелей), потребитель выступает как «управляемая игрушка», возможность создания искусственных (надуманных, придуманных) потребностей и товаров (услуг) для их удовлетворения.

На основании исследования множества источников можно выделить основные преимущества и недостатки, присущие обществу потребления с точки зрения социума (табл. 1).

Таким образом, можно отметить, что развитие общества потребления имеет существенные положительные стороны, способствующие ускорению расши-



ренного воспроизводства необходимой обществу продукции высокого качества, отвечающего конкретным актуальным запросам потребителей.

Табл. 1. Преимущества и недостатки общества потребления

Преимущества общества потребления	Недостатки общества потребления
Воспроизводство социальной структуры	Снижение качества жизни в плане недовольства индивидов уровнем жизни, статусом и т. д.
Изобилие товаров и их относительная доступность	Экологические проблемы вследствие объемов производства (увеличение выбросов в окружающую среду, все большее использование ограниченных природных ресурсов)
Развитие системы кредитования как еще одного фактора повышения доступности благ	Несоблюдение требований менеджмента здоровья на предприятиях (в результате постоянно увеличивающейся нагрузки на работников)
Экономическая система тесно переплетается с культурой потребления	Возможное снижение качества производимых товаров в погоне за их количеством и ассортиментом
Повышение уровня потребительских стандартов (развитие системы менеджмента качества)	Расширенное воспроизводства в развитых странах требует использования сырьевой базы стран третьего мира («сырьевые придатки»)

Понятия «потребление» и «потребительство» неотъемлемо связаны с развитием общества потребления. Развитие общества потребления происходит благодаря политике консьюмеризма, которая проецирует, что потребление направлено не только и не столько на удовлетворение физиологических, культурных и иных потребностей индивида, сколько на придание ему с помощью приобретения определенных товаров более высокой статусности.

Поскольку основной целью деятельности любой бизнес-структуры является максимизация прибыли, которую возможно получить, увеличивая объемы производства и реализации продукции, то именно сверхпотребление, потребительство будет этому способствовать. Эффективная деятельность бизнес-структур в данном направлении и создает условия для активного развития общества потребления.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фромм, Э.** Человек одинок [Электронный ресурс] / Э. Фромм. – Режим доступа: <https://libcat.ru/knigi/nauka-i-obrazovanie/filosofiya/212288-erih-fromm-chelovek-odinok.html>. – Дата доступа: 02.02.2024.

2. **Бодрияр, Ж.** Общество потребления: пер. с фр. / Ж. Бодрияр. – Москва: АСТ, 2020. – 320 с.

УДК 631.16

## ПЛАНИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

О. Д. МАКАРЕВИЧ, А. Н. МОХОВЦОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Планирование стратегического развития промышленного предприятия имеет высокую актуальность в современных экономических условиях, что обусловлено такими ключевыми точками роста, как:

- устойчивость и конкурентоспособность: планирование помогает предприятию создать стратегию для устойчивого развития и повышения конкурентоспособности на рынке;

- адаптация к изменениям: быстрые изменения в экономической ситуации требуют быстрых решений, поэтому стратегическое планирование позволяет предприятию адаптироваться к внешним изменениям, включая экономические, технологические и политические тренды;

- оптимизация ресурсов: планирование стратегического развития помогает оптимизировать использование ресурсов, включая финансовые, трудовые, материальные и информационные ресурсы;

- инновации: грамотное планирование стимулирует предприятие к инновациям и развитию новых продуктов или услуг, что способствует росту и развитию бизнес-процессов;

- управление рисками: планирование помогает идентифицировать потенциальные риски и разработать стратегии их снижения или устранения, что повышает финансовую устойчивость и платежеспособность;

- выход на новые рынки: использование стратегического планирования может помочь предприятию определить возможности для выхода на новые рынки или расширения деятельности, что способствует увеличению доходов и финансового результата предприятия.

В рамках исследования стратегического развития ОАО «Ольса» было установлено, что наилучшим вариантом для рассматриваемого промышленного предприятия является концентрация на стратегии диверсификации. Стратегия диверсификации – это подход к управлению, который фокусируется на увеличении разнообразия производимой продукции и распределении рисков между различными рынками. ОАО «Ольса» уже имеет значительный опыт и ресурсы для изготовления такого вида продукции, как медицинская мебель, в том числе медицинские кровати. Однако основной сбыт медицинского оборудования находит на внутреннем рынке, поэтому ему рекомендуется выходить на рынок медицинской мебели Российской Федерации, что уменьшит зависимость от одного сегмента рынка и создаст дополнительные источники доходов.

Рынок медицинских услуг в России является одним из самых динамично развивающихся секторов экономики. С каждым годом растет спрос на

специализированное медицинское оборудование, включая кровати, для обеспечения комфорта и безопасности пациентов. Основной сдерживающий фактор для развития в данном направлении – тенденция к снижению числа койко-мест в больницах общего профиля за последние 20 лет – в Российской Федерации имеется (рис. 1), однако в 2022 г. этот показатель достиг 1,142 млн коек, что предоставляет возможность внедрения на данный рынок [1].

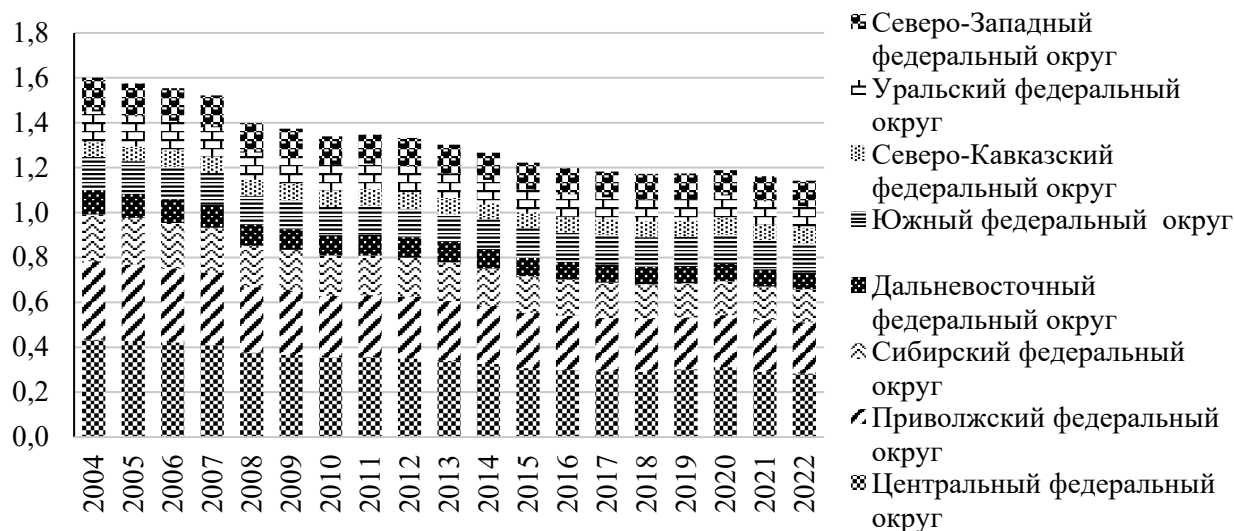


Рис. 1. Число больничных коек на конец отчетного года, млн коек

Рынок медицинской мебели в России характеризуется высокой степенью конкуренции, поэтому проведенный сравнительный анализ аналогичной продукции зарубежных, российских и отечественных производителей показал, что в качестве преимущества медицинских кроватей ОАО «Ольса» можно выделить их относительно невысокую стоимость, даже по сравнению с российским аналогом. При этом зарубежные и российские медицинские функциональные кровати не отличаются лучшим дизайном и повышенной комфортностью в эксплуатации. В рамках исследования рассчитан эффект от внедрения мероприятия по выходу на рынок Российской Федерации с медицинскими кроватями, который показал, что при полной реализации планового объема медицинских кроватей рентабельность реализованной продукции достигнет 13,08 %. Прирост валовой прибыли составит 11 859 тыс. р., что увеличит прибыль предприятия почти вдвое. Как итог, организация сбыта медицинских кроватей позволит удержать и увеличить доли рынка и объемы продаж, удовлетворить новые потребности рынка, изменить позиционирование о себе как о предприятии и увеличить свою прибыльность.

Таким образом, стратегическое планирование важно для обеспечения долгосрочной успешной деятельности промышленного предприятия в современной динамичной экономической среде.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здравоохранение [Электронный ресурс] // Федер. служба гос. статистики. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721>. – Дата доступа: 17.12.2023.

УДК 331.108.26

## МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ КАДРОВЫХ РЕШЕНИЙ

О. Д. МАКАРЕВИЧ, А. И. НИКОЛАЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Актуальность инновационного управления персоналом в организациях Беларуси обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности и устойчивого развития отечественных организаций. Цель исследования – на основе системного подхода разработать модель, которая позволит сформировать информационно-аналитическую среду для принятия эффективных кадровых решений в организации любой специализации.

Анализ литературных источников показал, что не существует системного подхода к оценке персонала организации, используемые подходы затрудняют формирование информационно-аналитической среды для принятия эффективных кадровых решений, поэтому была предложена модель системного анализа, которая включает в себя этапы, представленные на рис. 1.



Рис. 1. Модель информационно-аналитической среды для принятия эффективных кадровых решений в строительной организации

Алгоритм модели информационно-аналитической среды для принятия эффективных кадровых решений в организации позволяет учесть и сравнить тенденции развития показателей использования персонала как на национальном уровне, так и на уровне отдельной организации, выявить сильные и слабые стороны кадровой политики организации, что в дальнейшем явится основой для принятия кадровых управленческих решений и разработки перспективных направлений развития стратегии организации в данной области.

В рамках данного исследования была изучена существующая система кадрового управления на примере СУП «Могилевская СПМК» с использованием разработанной модели, представленной на рис. 1, по результатам чего установлено, что руководством организации не используются новые методы отбора персонала, по-прежнему при найме на работу используются профессионально-квалификационные требования к рабочим местам по справочникам. Стоит отметить, что в строительной организации проводятся производственные курсы для рабочих, осуществляется подготовка и переподготовка кадров и обучение смежным профессиям, обучение работников, зачисленных в резерв на выдвижение на руководящие должности. К одним из недостатков также можно отнести такой аспект: при оценке результатов работы служащих и рабочих при повременной системе оплаты труда стимулирующие выплаты назначаются обычно в зависимости от иерархии управления, не учитывая результаты работы.

В целях совершенствования работы по привлечению новых, более квалифицированных сотрудников на СУП «Могилевская СПМК» предлагается использовать метод оценки профессионально значимых качеств специалиста, который можно применить при оценке требуемых качеств специалиста при приеме или назначении на должность. Для апробации данного предложения было проведено анкетирование руководителей предприятия для определения профессионально значимых качеств вакантной должности – специалиста по кадрам. По результатам оценки получено, что наиболее значимыми для данной профессии являются такие свойства личности, как мыслительные, attentionные, волевые, коммуникативные и эмоциональные индивидуально-психологические свойства. Поэтому при подборе кандидата на должность специалиста по кадрам или оценке результатов работы имеющегося работника нужно учитывать данные характеристики, что в конечном итоге и определяет профессиональные характеристики персонала предприятия.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило актуальность рассматриваемого вопроса эффективного управления одним из основных факторов производства – трудовым ресурсом. Применение современного системного аналитического аппарата может позволить организации обеспечить конкурентоспособность не только производимого продукта, но и приобрести конкурентные преимущества за счет высококвалифицированного эффективного персонала как движущей силы в развитии организации.

УДК 621.74.04

## СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЛИТЕЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫЖИГАЕМЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ

А. А. МАНОХИН, В. В. МОРОЗОВ

Государственный научный центр Российской Федерации «НАМИ»  
Москва, Россия

Появление доступных 3D-принтеров и расходных материалов дало толчок к появлению новых возможностей в литейном производстве, а именно к оперативному изготовлению моделей из разных пластиковых материалов и применению некоторых из них как прообраз будущих литых заготовок из сплавов разных марок.

Достоинством данного технологического прорыва является возможность в короткий промежуток времени с помощью систем CAD/CAE провести подготовку литейных моделей, при необходимости внести изменения как в итерациях изготовления литых заготовок, так и по результатам механической обработки. Сокращение времени при изготовлении первой партии или первой отливки до 30 раз делает это направление привлекательным. Другой особенностью данной технологии является отсутствие необходимости в проектировании оснастки, изготовлении ее и хранении, все уместается в памяти компьютера. В любой момент можно вернуться к этому проекту, повторить или передать его средствами связи и запустить в условиях иного производства. В настоящее время стали появляться литейные производства (рис. 1), базирующиеся на данном принципе производства. Вместо литейной оснастки используются принтеры, которые методично и достаточно точно печатают литейные модели, отвечающие процессам формообразования и организации процессов деструкции. На рынке изготовления выжигаемых моделей наиболее качественно себя зарекомендовал процесс построения моделей из PMMA-материала и PLA.



Рис. 1. Размещение принтеров по созданию моделей или элементов моделей (фирма ООО «Стивидор», Московская область, Ступино)

В дальнейшем на базовых формообразующих технологиях, таких как литье по выплавляемым моделям, изготавливают оболочковые керамические формы или гипсо-динасовые формы. На этапе прокалики формы выполняется выжигание моделей в соответствии с законами поведения материала при высоких температурах. По результатам прокалики в литейной форме образуется полость, которая при заливке заполняется расплавом и позволяет получить отливки широких диапазонов: от алюминия до спецсталей, титана и магния (рис. 2 и 3).

Ограничением развития данной технологии является этап выжигания, который сопровождается активным выделением газовых продуктов от выжигания пластиковых моделей, превращением сажистых отложений и созданием запаха в ближайшем окружении. Решением данных проблем отчасти является использование систем газового дожигания отходящих газов из печи или возможность все работы по прокатке проводить в газовой печи с программируемыми параметрами печи по скорости нагрева и выдержки.

Наибольший экономический эффект от данной технологии будет наблюдаться при изготовлении сложных по геометрии литых заготовок и используемых сплавов. При подготовке технологии с момента печати модели до получения первой отливки на организованном производстве уходит от 10 до 14 дней.

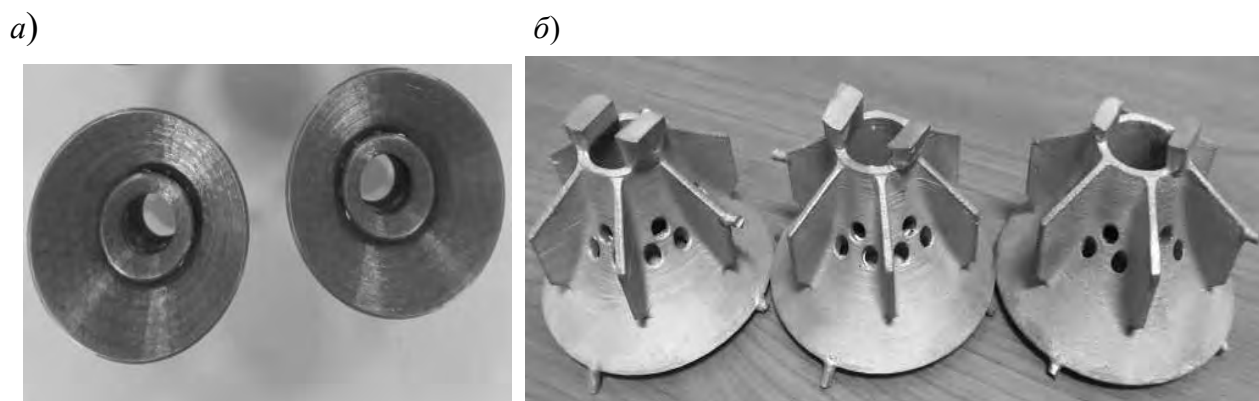


Рис. 2. Изготовление литых заготовок соплового аппарата из жаропрочного сплава ВХ4 по выжигаемым полимерным моделям: *а* – выжигаемая воскополимерная модель; *б* – литые заготовки



Рис. 3. Этапы изготовления корпуса помпы из сплава АК7пч по выжигаемой модели из РММА-материала

УДК 658.303.732

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ  
СБЫТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

Л. В. НАРКЕВИЧ, В. О. ДЕМИДЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Применение методов и средств современной аналитики выступает важным фактором в управлении эффективностью сбытовой деятельности промышленных предприятий, позиционирующихся на рынках товаров народного потребления. На всех уровнях иерархии управления необходимо единое информационно-аналитическое пространство поддержки принятия решений в выбранном кластере проектного управления по критериям эффективности, что сегодня встроено в систему устойчивого развития, экосистему и называется зеленой экономикой, способной выживать в условиях мировой глобализации, международной интеграции и цифровизации экономического пространства [1]. Поведенческая экономика, институциональный анализ исследуют ситуации уровня доверия лиц, принимающих решения, к качеству аналитических процедур, объективности и своевременности результатов объектного анализа, в частности, сбытовой деятельности. Исследователями в данной области отмечен низкий уровень аналитической поддержки управленческих решений на отечественных предприятиях, характеризующийся применением устаревших методов и технологий, отсутствием единой методологии и наличием информационной разрозненности [1]. Это обуславливает актуальность проблемы недостаточной информационно-аналитической поддержки внутрифирменного управления сбытовой деятельностью предприятий.

Объектом исследования выбрана сбытовая деятельность производителя текстильной галантереи ОАО «Лента», функционирующего в динамично развивающейся рыночной среде и условиях цифровизации экономики. Предметной областью исследования определены аналитические процессы поддержки принятия решений в системе управления сбытовой деятельностью по критериям ее эффективности. В соответствии с поставленной целью произведена разработка информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении эффективностью сбытовой деятельности. В процессе разработки реализован базис комплексного, многоаспектного анализа проектного управления с целевым вектором выбора оптимальных управляющих воздействий на систему сбыта по критериям роста его эффективности. Основные результаты исследования состоят в следующем: обоснованы подходы и аналитические методы к проектированию информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении эффективностью сбытовой деятельности как единого информационного пространства результатов многоаспектного анализа проектного управления; разработана информационно-аналитическая система поддержки принятия решений при управлении сбытовой деятельностью ОАО «Лента» в контексте особенностей текстильной промышленности, актуализации исследуемых факторов, выбора оптимальных управляющих воздействий на систему сбыта по критериям роста его эффективности;



разработанная система позволила повысить уровень качества проводимого в ОАО «Лента» анализа, комплексно оценить эффективность сбытовой деятельности предприятия с использованием современных аналитических методов, выявить диспропорции параметров эффективности управления сбытом; рекомендован комплекс проектного управления: расширение каналов сбыта с использованием инструментов электронной коммерции, оптимизация товаропроводящей сети предприятия по критерию роста рентабельности продаж, внедрение программ потребительской лояльности в рамках кредитной политики. Новизной исследования выступает авторский подход к разработке и адаптации формирования информационно-аналитической системы ППР при управлении эффективностью сбытовой деятельности, обеспечивающей единое аналитическое пространство взаимосвязей и взаимозависимостей параметров проектного управления экосистемой предприятия.

По результатам аналитической части установлен положительный тренд роста объемов производства и отгрузки по итоговой строке; кризисным периодом снижения объемов сбыта по всем ассортиментным позициям отмечены 2019–2020 гг.; к 2021 г. предприятие повысило количественные параметры сбыта. Наибольшее снижение объемов продаж приходится на текстильные застёжки «Контакт», гардинные изделия, комплекты швейных изделий; рост спроса на ленточные, прочие изделия. Наиболее крупными рынками сбыта ОАО «Лента» являются рынки Беларуси, России, Украины, Казахстана и Латвии. Просматривается снижение объема сбыта на белорусский рынок, рынок Украины и до этого быстро растущий рынок Казахстана; значительно вырос объем сбыта на российский рынок и динамично растущий рынок Латвии. Продажи по странам имеют значительное разграничение по ассортименту, что определяет структуру каналов распределения на внутреннем рынке и за рубежом.

Основными каналами сбыта на внутреннем рынке являются продажи напрямую, через каналы электронной торговли и через фирменную торговую сеть, доли сбыта которых увеличиваются. Продукция ОАО «Лента» имеет средний уровень конкурентоспособности. По сравнению со своими конкурентами продукция предприятия имеет более высокие цены, однако пропорционально и более высокое качество. По всем товарным группам наблюдается снижение показателей рентабельности продукции и рентабельности продаж по причине повышения затратоемкости продукции.

Таким образом, рекомендовано повышение эффективности управления сбытовой деятельностью ОАО «Лента» по направлениям: расширение сети продаж через электронные каналы сбыта, что рассматривается как мощный ресурс роста сбыта; оптимизация товаропроводящей сети с использованием логистики размещения розничных торговых объектов; повышение гибкости кредитной политики и снижение длительности финансового цикла.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наркевич, Л. В. Модернизация аналитических процессов распределительной логистики предприятий в условиях цифровой экономики / Л. В. Наркевич, Е. А. Наркевич / Экон. журн. – 2021. – № 2 (62). – С. 6–18.

УДК 336.64

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ППР В СБЫТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Л. В. НАРКЕВИЧ, С. В. ЖУКОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Методика анализа сбытовой деятельности включает в себя набор способов (приемов), показателей и принципов анализа эффективности сбыта. При решении поставленных задач использованы горизонтальный, вертикальный анализ динамики параметров сбыта, детерминированный и стохастический многомерный факторный анализ. Основными количественными и качественными показателями сбытовой деятельности в исследовании рассмотрены: тренд изменения объема реализации продукции, прибыли от реализации, рентабельности продаж, рентабельности реализованной продукции; уровень затоваренности склада, коэффициент соотношения запасов готовой продукции и ее выпуска, уровень дебиторской задолженности, показатели ритмичности отгрузки, показатели качества и конкурентоспособности. Принципиальным отличием проектируемой информационно-аналитической системы поддержки принятия решений (ППР) при управлении сбытовой деятельностью рассмотрены встроенные модели, которые поддерживают факторный анализ количественных и качественных результативных параметров сбыта с декомпозицией факторных систем в соответствии с корпоративными целями и задачами, что требует гибкости принятия решений по фактору времени и сценарности выбора наиболее рациональных вариантов решений с поддержкой систем цифровизации аналитических процессов [1]. В ходе исследования установлено отсутствие в управлении сбытовой деятельностью ОАО «Лента» факторных систем априори и ИТ-проектов в области автоматизации организации, планирования сбыта. Соответственно, их практические результаты в настоящее время заметно отстают от потребностей корпоративного управления сбытовой деятельностью в условиях мировой глобализации и цифровизации экономического пространства. В качестве факторов изменения результативных показателей рассмотрены структурные факторы; факторы себестоимости реализованной продукции; факторы реализации продукции по объемам, структуре и цене реализации; порядок организации аналитических процедур предусматривает выделение факторов изменения ассортиментной структуры реализованной продукции, объемов отгрузки и цен отдельных видов изделий, что является также существенным и требует проведения данной дифференциации. На основе разработанной структурно-логической модели факторного анализа показателей эффективности сбытовой деятельности построены исходные факторные функциональные зависимости управления. Уровень качества факторного анализа в значительной мере зависит от содержательной наполняемости уравнений взаимосвязи показателей, поддерживающей проектно-ориентированное факторное управление сбытом в режиме реального времени. Факторное моделирование систем управления сбытовой деятельностью предприятия в традиционном виде не исследует взаимосвязи и взаимозависимости между параметрами

производственно-сбытовой деятельности, определяющими конкурентоспособность продукции предприятия по себестоимости и цене. Учитывая фактор загрузки производственной мощности, в настоящем исследовании актуализированы фактор себестоимости реализованной продукции и установленная для предприятий, относящихся к виду экономической деятельности «Производство текстильных изделий, одежды, изделий из кожи и меха», зависимость себестоимости от значительно высокого уровня материалоемкости, трудоемкости производимой продукции. В связи с этим в факторные модели введены параметры расхода материалов на единицу продукции, цен на материалы, прямые трудовые затраты с отчислениями, прочие затраты с последующим выходом на цену, объемы реализации, выручка от реализации, прибыль от реализации продукции, рентабельность продаж. Построенные факторные модели актуализированы исходя из взаимосвязи параметров затрат на производство и реализацию продукции в контексте маржинального деления «директ-костинг», объемов реализации и цен на продукцию. Разработанная структурированная системы показателей отвечает целям объективной оценки и мониторинга эффективности управления сбытовой деятельностью предприятия.

По результатам общесоматического аналитического блока отмечены диспропорции относительных показателей динамики факторов, обеспечившие снижение эффективности сбытовой деятельности ОАО «Лента» по изменениям, выразившимся в увеличении затратноемкости (в частности, материалоемкости) отгружаемой продукции, снижении рентабельности продаж, рентабельности продукции, коэффициента оборачиваемости активов. В 2022 г. рентабельность реализованной продукции снизилась на 2,15 п. п.; рентабельность продаж – на 1,24 п. п. Отмечен положительный тренд роста рентабельности совокупных активов, рентабельности собственного капитала: в 2022 г. цепной абсолютный прирост составил 6,44 и 8,75 п. п. соответственно; базисный – 1,41 и 1,18 п. п. Интенсивность использования совокупного капитала в рассматриваемом периоде снизилась относительно базисного 2019 г. и выросла в 2022 г. относительно 2020–2021 гг.: базисный темп снижения составил 92,0 %; цепной темп роста – 106,6 % (указывает на ускорение оборачиваемости активов предприятия). В 2022 г. практически по всем рассматриваемым ассортиментным позициям (за исключением медицинских перевязочных изделий, погон, прочих изделий) отмечено снижение объемов производства и реализации: наиболее яркий негативный тренд установлен по текстильным застегкам «Контакт», гардинным изделиям, комплектам швейных изделий.

Таким образом, обоснована необходимость детального анализа динамики развития параметров сбытовой деятельности по разработанному алгоритму в целях выявления тенденций и пропорций по критериям эффективности.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наркевич, Л. В. Параметрический подход в антикризисном финансово-экономическом анализе / Л. В. Наркевич // Экон. журн. – 2019. – № 3 (55). – С. 55–74.

УДК 338.984

## ПЕРСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Л. В. НАРКЕВИЧ, В. В. СТЕПАНОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Перспективный анализ встроен в целостную систему аналитической поддержки управления оборотными средствами промышленных предприятий и в данном исследовании представлен как автономная подсистема комплексного анализа, обеспечивающего целостность информационно-аналитической платформы управления. Сложность применения проектного моделирования, ситуационного прогнозирования, нечеткого моделирования, нейронно-сетевое моделирования и других инструментов перспективной аналитики определяется индивидуальностью подхода к объекту управления, необходимостью учета разноректорных факторов воздействия на объект, их многообразии и уровень управляемости в сложной экономической системе предприятий промышленности [1]. Как барьер, препятствующий развитию данного блока аналитических процедур, рассмотрены также низкий уровень цифровой трансформации и отсутствие высококвалифицированных специалистов с интегрированным ИТ и прикладным образованием в инновационных экосистемах предприятий. Все это делает актуальным активное использование доступных методологий ABC-XYZ-анализа, экспертных оценок, гибкого бюджета в оперативном управлении оборотными средствами предприятий. Целью исследования теоретического базиса в предметной области исследования выступает проектирование информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении эффективностью использования оборотных средств промышленного предприятия. Основной задачей исследования является разработка проекта управления объектами оборотных средств по методике многоэтапного перспективного анализа, отличающейся объективностью, оперативностью, гибкостью, учетом отраслевых особенностей, возможностью применения распространенного программного обеспечения, что позволит размещать, сохранять и наращивать оборотные средства путем интегрированного управления его элементами, максимизировать доходы и обеспечить устойчивое развитие текстильного предприятия. В качестве решения обозначенных в аналитической части диспропорций рассмотрены технологии управления оборотными средствами, которые в процессе деятельности рекомендовано учесть в контексте роста экономической эффективности. В исследовании рассмотрены следующие мероприятия по ускорению оборачиваемости элементов оборотных средств ОАО «Моготекс»:

- 1) сокращение срока пребывания производственных запасов по методике оптимизации в задаче управления многономенклатурными производственными запасами по направлениям: оптимизация параметров поставки; выбор поставщика применительно к многономенклатурной поставке по критериям сортамента сырья, объемов поставки, удаленности поставщика с целью реализации резервов экономии капитала, инвестированного в запасы (на основе ABC-XYZ-анализа

запасов; многономенклатурной модели с единым циклом поставок нитей полиэфирных контрагентом ОАО «СветлогорскХимволокно»);

2) сокращение срока пребывания готовой продукции за счет оптимизации стратегии взаимодействия с посредниками (на основе рейтингования контрагентов товаропроводящей сети ОАО «Моготекс» методом экспертных оценок; результатов анализа ассортиментного портфеля методом Дибба – Симкина по критериям конкурентоспособности портфеля отгружаемых посредникам тканей: индексу концентрированности и индикатору напряженности; разработки программы лояльности на примере дилера ООО «Моготекс-Сервис-Центр»);

3) сокращение срока пребывания средств в дебиторской задолженности по параметру соотношения дебиторской и кредиторской задолженности в системе пропорций платежной дисциплины с использованием матричной модели управления дебиторской и кредиторской задолженностями и IT-технологий.

Сделан вывод: в ОАО «Моготекс» не ведется оптимизация производственных запасов (отсутствует группа СХ, имеет место группа СZ); созданы сверхнормативные запасы сырья из-за нестабильности их потребления, что привело к росту логистических затрат, замедлению оборачиваемости и росту производственного цикла предприятия. На этапе выбора поставщика и процедуры закупки материальных ресурсов группы химических нитей рекомендован поставщик – ОАО «СветлогорскХимволокно»: из общего объема полиэфирных нитей, используемых по проекту производственной программы, 74,53 % заложены на долю ОАО «СветлогорскХимволокно»; 19,86 % составляет сырье ЗАО СП «Сопотекс». Данные пропорции сводят до минимума как транспортные расходы, так и возможные потери при транспортировке, минимальные сроки наработки и поставки.

Рекомендован переход от стихийно формируемых групповых циклов в многономенклатурной модели Уилсона (с неизбежным отклонением от «идеальных» параметров модели) к целенаправленной оптимизации единых групповых циклов. Расчет параметров многономенклатурной модели с единым циклом поставок произведен при условии совместной поставки всей номенклатуры группы полиэфирных нитей от контрагента ОАО «СветлогорскХимволокно»; алгоритм расчетов соответствует методике модели. Годовые затраты управления запасами при многономенклатурной модели с единым циклом поставок нитей полиэфирных контрагентом ОАО «СветлогорскХимволокно» спроектированы в размере 104,964 тыс. р., что на 171,855 тыс. р. (или на 62,08 %) ниже затрат независимых поставок нитей полиэфирных от нескольких поставщиков. При этом периодичность поставок снизилась до 10,992 дней, количество поставок составило 23,199 раза в год и уменьшилось на 10,577, что соответствует относительному снижению в размере 31,27 %.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нипатрук, Д. А.** Комплексный подход к управлению оборотными средствами предприятия / Д. А. Нипатрук // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – 182 с.

УДК 33:519.2

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СБЫТОМ

Л. В. НАРКЕВИЧ, М. А. СТЕПАНОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Проект информационно-аналитической системы поддержки принятия решений (ППР) в управлении сбытовой деятельностью ОАО «Лента» включает стохастический метод исследования взаимосвязей результативных и факторных параметров по критериям роста эффективности сбытовой деятельности в контексте инновационно-инвестиционного проектного управления сбытом. Требованием проектного управления выступает объективный выбор и оценка факторов, в значительной мере определяющих динамику объема сбыта предприятия [1].

Проведение предварительного исследования позволило выдвинуть гипотезу о том, что величина объема сбыта продукции предприятия зависит от следующих факторов: уровня удовлетворенности населения в текстильных изделиях; продолжительности оборота дебиторской задолженности покупателей; уровня цифровизации сбыта. Соответственно, для стохастического анализа в качестве результативного показателя принят объем отгрузки продукции ( $Y$ ); в соответствии с выявленными по результатам факторного анализа направлениями роста выбраны следующие факторы регрессии:  $X_1$  – уровень удовлетворенности населения продукцией текстильной галантереи ( $YU$ , определен как средний уровень потребления на душу населения);  $X_2$  – продолжительность оборота дебиторской задолженности, дней ( $Pob_{дз}$ ; расчет произведен исходя из кредитовых оборотов);  $X_3$  – уровень цифровизации сбыта ( $УЦ$ , определен как доля реализации через каналы электронной торговли). Для подтверждения или опровержения указанной гипотезы, а также определения величины и направления влияния указанных факторов произведен корреляционный анализ.

В качестве исходной информации выбраны данные оперативных документов служб сбыта ОАО «Лента», официальных данных Национального статистического комитета Республики Беларусь. Рассчитанные в таблице коэффициенты корреляции для линейной и степенной форм зависимости не позволяют сделать однозначный вывод о предпочтительности линейной или степенной формы зависимости. Поэтому построена указанная зависимость в двух формах и выбрана наилучшая на основе анализа регрессионной статистики.

Результаты регрессионного анализа линейной формы зависимости показали: уравнение значимо, о чем свидетельствует непревышение показателя «Значимость  $F$ » предельного уровня ошибки, установленного равным 0,05.  $P$ -уровень по всем факторам меньше 0,05, а значения  $t$ -статистики выше  $t$ -критического ( $t_{табл} = 2,179$ ), что обосновывает высокий уровень значимости спроектированного регрессионного уравнения. Результаты регрессионного анализа степенной формы зависимости также определяют статистическую значимость сформированного уравнения регрессии. Сравнительный анализ позволил сделать выводы: показатели

t-статистики примерно одинаковы для всех исследуемых факторов и при линейной, и при степенной формах зависимости, поэтому для того, чтобы выбрать лучшую форму зависимости, сравним статистическую значимость полученных уравнений регрессии по показателю R. Визуализация показала, что критерии регрессионной статистики для линейной формы зависимости выше по сравнению со степенным форматом взаимосвязи. По результатам сравнительного анализа R-статистики, исходя из представленных аналитических и графических данных, сделан вывод о том, что более приемлемой для отражения зависимости между объемом отгрузки продукции и комплексом выбранных факторов является линейная форма зависимости. Регрессионный анализ установил положительную зависимость объема сбыта продукции предприятия с уровнем цифровизации сбыта, отрицательную – с продолжительностью оборота дебиторской задолженности покупателей и уровнем удовлетворенности населения в текстильных изделиях. Увеличение уровня удовлетворенности населения в текстильных изделиях на 1 р./чел. Способствует снижению объема сбыта предприятия на 0,8692 р.; продолжительности оборота дебиторской задолженности на 1 день – снижению на 25,8968 р.; уровня цифровизации сбыта на 1 % – увеличению на 524,1061 р.

В качестве практических рекомендаций исследования ОАО «Лента» в первую очередь следует расширить сеть продаж через электронные каналы сбыта, что может способствовать значительному увеличению объема сбыта. Также необходимо обратить внимание на сокращение продолжительности оборота дебиторской задолженности покупателей, на что компания частично может способствовать повышением гибкости ценовой политики в отношении с клиентами. Отрицательное влияние повышения удовлетворенности населения в текстильных изделиях на объем сбыта ОАО «Лента» объясняется высоким уровнем конкуренции на рынке, что требует повышения конкурентоспособности продукции по цене как наиболее актуальному для предприятия фактору.

Таким образом, основной резерв повышения эффективности сбытовой деятельности предприятия в существующих условиях состоит в увеличении объема реализации продукции, что позволит увеличить загрузку производственной мощности, снизить уровень запасов готовой продукции и уровень задолженности покупателей, увеличить уровень прибыли от реализации и снизить затратно-емкость продукции за счет эффекта масштаба производства. Эффект от предлагаемых мероприятий оценивается повышением уровня рентабельности продаж и оборачиваемости активов. В качестве практических рекомендаций исследования ОАО «Лента» предложены: расширение сети продаж через электронные каналы сбыта, что рассматривается как мощный ресурс роста сбыта; оптимизация товаропроводящей сети с использованием логистики размещения розничных торговых объектов; повышение гибкости кредитной политики и снижение длительности финансового цикла.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Наркевич, Л. В.** Системный анализ производства и реализации продукции предприятий АПК / Л. В. Наркевич // Проблемы экономики: сб. науч. тр. – Горки: БГСХА, 2020. – № 2 (31). – С. 136–152.

УДК 330.44

АНАЛИЗ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ОСНОВНЫХ СРЕДСТВ ПРЕДПРИЯТИЯТ. Г. НЕЧАЕВА, Т. А. БОРОДИЧ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Современные условия хозяйствования предъявляют значительные требования к конкурентоспособности продукции, что, в свою очередь, требует техническое перевооружение предприятий, обновление и реконструкцию имеющихся основных средств, улучшение использования действующих мощностей, ускорение замены устаревшей техники, повышение производительности машин и оборудования. Основные средства любого предприятия играют огромную роль в процессе труда, т. к. они в своей совокупности образуют производственно-техническую базу и определяют производственную его мощь.

Проведенный анализ основных средств одного из крупных строительных предприятий Могилевской области позволяет сделать следующие выводы.

Основные средства предприятия увеличились на 74 тыс. р. в 2022 г., по сравнению с 2021 г., и сократились на 5 506 тыс. р. относительно 2020 г.

В течение 2021–2022 гг. наблюдается снижение стоимости машин и оборудования на 381 тыс. р., снижение стоимости зданий и сооружений на 14 тыс. р., рост транспортных средств на 443 тыс. р., инструмента и производственного инвентаря – на 237 тыс. р.

Наибольший удельный вес в составе основных средств за анализируемый период составляют машины и оборудование, что характерно для предприятия строительной отрасли.

Структура основных средств за 2020–2022 гг. также претерпела изменения. Так, в 2022 г. доля машин и оборудования составила 73,91 %, что на 4,86 п. п. больше, чем в 2020 г., и на 0,65 п. п. меньше, чем в 2021 г.

В то же время удельный вес зданий и сооружений в период 2021–2022 гг. имеет тенденцию снижения с 26,24 % до 19,76 %, для транспортных средств рост с 2,38 % до 3,95 %, что может свидетельствовать о росте направленности предприятия в сторону обновления машин и оборудования и подвижного состава.

За 2020–2022 гг. стоимость основных средств сократилась на 7,53 %, в том числе активной часть выросла на 100,98 %, стоимость транспортных средств выросла в 1,5342 раза, что обусловлено приобретением новых автомобилей.

Стоимость зданий в 2022 г. сократилась на 39,35 %, что обусловлено реконструкцией цехов производства.

Достаточно равномерное снижение стоимости основных средств наблюдается по машинам и оборудованию – 99,73 % в 2021 г. и 99,24 % в 2022 г.

Проведенный анализ технического состояния основных средств за 2021–2022 гг. показывает, что в течение 2022 г. техническое состояние основных средств изменилось незначительно. Такой параметр, как коэффициент годности основных средств, снизился всего на 0,0908, коэффициент годности



активной части основных средств – на 0,1118, машин и оборудования – на 0,1197, а транспортных средств вырос на 0,0368. Соответственно, повысились показатели, характеризующие степень изношенности активной части основных средств, за исключением транспортных средств. То есть техническое состояние основных средств предприятия следует оценить как неудовлетворительное с тенденцией к незначительному снижению, т. к. коэффициент годности на протяжении 2021–2022 гг. был не более 53 %.

Фондоотдача активной части основных средств в 2022 г., по сравнению с 2021 г., выросла на 0,117, темп прироста составил 10,9 %. Фондоотдача машин и оборудования выросла на 0,138 или 12,01 %.

Снижение фондорентабельности обусловлено снижением рентабельности продукции на 5,061 п. п., удельного веса машин и оборудования – на 0,082 п. п.

Проведенный анализ свидетельствует о росте эффективности использования основных средств предприятия в 2022 г. относительно 2021 г., на что указывает рост фондоотдачи на 0,131 р. и снижение фондоемкости на 0,168 р. Снижение фондорентабельности указывает на недостатки в использовании основных средств (рост затрат на выпуск продукции). Снижение фондовооруженности на 2,677 указывает на снижение обеспеченности трудовых ресурсов основными средствами.

Повысить эффективность использования основных средств предприятия можно в том числе за счёт сокращения затрат и роста объемов произведенной продукции, работ, услуг.

Проведенный анализ показал, что рентабельность продукции отрицательно отразилась на фондорентабельности и привела к ее снижению. Анализируемое предприятие использует свой подвижной состав для перевозок продукции в Российскую Федерацию. В обратном направлении возможна загрузка автомобилей предприятия сопутствующими грузами или грузами, предназначенными для рассматриваемого предприятия от поставщиков из России. Вследствие предложенного мероприятия расходы предприятия увеличатся на 241,55 р. Условно-переменные расходы составляют 1 104,44 р. и увеличиваются на 241,55 р. после внедрения мероприятия. В качестве фактора воздействия выступают доходы от перевозки, которые увеличивают выпуск продукции, работ, услуг на 6 275,6 р., способствуя тем самым росту фондоотдачи транспортных средств на 0,003 р. В свою очередь рост фондоотдачи транспортных средств приведет к росту фондоотдачи активной части на 0,0001 р. Резерв роста фондорентабельности при этом составит 0,001 п. п.

Таким образом, применение факторного анализа при оценке эффективности использования основных средств организации позволяет выявить наиболее проблемные места и дать практические рекомендации по мобилизации выявленных в результате анализа резервов.

УДК 338

## ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Т. Г. НЕЧАЕВА, А. В. КОТОВА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Экономическое развитие – это процесс, включающий увеличение производительности и доходов населения, улучшение качества жизни, освоение новых технологий, развитие инфраструктуры и предпринимательства. Оно является ключевым вопросом для стран и регионов, поскольку способствует росту экономики и обеспечивает устойчивое развитие [1].

Для разработки основных направлений развития промышленного предприятия текстильной промышленности можно применить корреляционно-регрессионный анализ.

Корреляционно-регрессионный анализ – классический метод стохастического моделирования хозяйственной деятельности. Он изучает взаимосвязи показателей хозяйственной деятельности, когда зависимость между ними не является строго функциональной и искажена влиянием посторонних, случайных факторов [2].

За результативный показатель возьмем рентабельность продаж как один из основных финансовых показателей для оценки эффективности работы компании. В качестве факторов модели используем долю экспорта, производительность труда, затратноёмкость.

Рассчитанная матрица коэффициентов парной корреляции свидетельствует о сильном влиянии доли экспорта и производительности труда на рентабельность продаж, а также о слабом и обратном влиянии затратноёмкости на рентабельность продаж (коэффициенты парной корреляции равны 0,62; 0,73 и минус 0,5 соответственно).

Коэффициент детерминации равен 0,88, т. е. 88 % изменения рентабельности продаж зависит от изменения выбранных факторов (доли экспорта, производительности труда, затратноёмкости), что свидетельствует о высокой точности построенной модели [3].

По значениям частных коэффициентов эластичности можно сделать вывод о том, что в первую очередь для повышения рентабельности продаж предприятию необходимо разрабатывать мероприятия, направленные на рост доли экспорта и производительности труда и снижение затратноёмкости продукции.

Для разработки направлений повышения производительности труда необходимо провести всесторонний анализ использования трудовых ресурсов.

Исходя из проведенного анализа по данным предприятия за 2020–2022 гг., можно сделать вывод, что превышающие темпы роста среднемесячной заработной платы относительно динамики отработанного времени и среднесписочной численности работников указывают на снижение интенсивности использования персонала предприятия, рост расходов на персонал, что косвенно может

свидетельствовать о неэффективной политике управления трудовыми ресурсами предприятия.

Показатели эффективности использования трудовых ресурсов, а именно рентабельность продаж, прибыль на одного работника и производительность труда, имеют положительную тенденцию к росту в 2022 г.

Отрицательное влияние на рентабельность персонала в 2021 г. имеет рентабельность продаж, однако в 2022 г. данный показатель можно охарактеризовать как главный фактор, который имеет положительное влияние.

В качестве мероприятия по повышению производительности труда предлагается закупка и модернизация технологического оборудования. Срок окупаемости предалекого инвестиционного проекта составляет 3 года, что указывает на целесообразность инвестирования средств. Предлагаемая модернизация оборудования позволит повысить прибыль на одного работника на 2,07 тыс. р., а среднегодовую производительность труда на 10,461 тыс. р.

Расширение экспортного потенциала предприятия возможно за счет оптимизации ассортимента с использованием экономико-математического моделирования. Произведенная оптимизация ассортиментной политики дает ответ на вопрос, какой объем продукции в ассортиментном разрезе следует производить, чтобы при заданных условиях хозяйствования обеспечить предприятию максимум рентабельности продукции и плановые величины продаж продукции на внешнем рынке.

Снижение затратоемкости продукции возможно за счет рационализации закупочной деятельности и теплоизоляции теплопроводов главного производственного корпуса, в результате чего затратоемкость сократится на 0,074 %, способствуя тем самым росту рентабельности продаж на 0,064 %.

Результатом внедрения предложенных мероприятий будет сокращение расходов, повышение экспортного потенциала, рост финансовых результатов, что приведет к повышению эффективности производственно-хозяйственной деятельности предприятия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понятие экономического развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://spravochnick.ru/ekonomika/ponyatie\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/?ysclid=ls1tsdvolq752341980](https://spravochnick.ru/ekonomika/ponyatie_ekonomicheskogo_razvitiya/?ysclid=ls1tsdvolq752341980). – Дата доступа: 31.01.2024.
2. Корреляционно-регрессионные модели. Логистика снабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studme.org/49132/logistika/korrelyatsionno-regressionnye\\_modeli?ysclid=ls1tyvry6090600874](https://studme.org/49132/logistika/korrelyatsionno-regressionnye_modeli?ysclid=ls1tyvry6090600874). – Дата доступа: 31.01.2024.
3. Эффективность использования трудовых ресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/5760977/page:16/>. – Дата доступа: 31.01.2024.

УДК 339.178

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ОАО «ОЛЬСА» В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

О. А. ПИЧУГОВА, А. С. МИХАЛЬЦОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

ОАО «Ольса» представляет собой металлообрабатывающее предприятие среднего размера, выпускающее серийную и мелкосерийную продукцию: товары мебельной группы, включающей складные и стационарные металлические кровати, мебель в наборах (гостиные, террасные), широкий ассортимент товаров для организации отдыха и кемпинга (качели, шезлонги, кресла складные), мебель для медицинских учреждений, для предприятий общественного питания, детские игровые комплексы, спортивные уличные тренажеры. Для продвижения продукции предприятие использует как традиционные средства рекламы, так и рекламу в сети Интернет, в частности рекламу на сайте и в социальных сетях.

Для исследования активности ОАО «Ольса» в социальных сетях были взяты официальные страницы предприятия в Инстаграм, ВК и Телеграм, т. к. данные социальные сети наиболее широко используются в Беларуси и странах СНГ. Для анализа использовались данные за два месяца (декабрь 2023 г. и январь 2024 г.). Для оценки параметров социальных сетей применялась пятибалльная шкала (где 0 – отсутствие параметра, 5 – наилучшее значение). Результаты исследования представлены в табл. 1.

По результатам исследования наибольшая активность предприятия наблюдается в Инстаграм. В данной социальной сети за деятельностью предприятия следит 424 чел., которые активно реагируют на новые публикации. Также стоит отметить отличное качество контента, которое выражается в привлекательной, информативной картинке. На официальной странице ОАО «Ольса» в Инстаграм легко можно найти контактную информацию предприятия, а также дать обратную связь.

На втором месте по активности оказался Телеграм. Связано это с наибольшим количеством подписчиков, а также с огромным количеством публикаций, которые имеют довольно разнообразную тематику. Однако стоит отметить, что некоторое количество баллов Телеграм теряет из-за невозможности дать обратную связь и отсутствия контактной информации. Также есть проблема с качеством контента: малое внимание уделяется продукции предприятия.

По итогам анализа последнее место занимает ВК, набрав 19 баллов. Из преимуществ можно выделить наличие и полноту контактной информации, а также возможность обратной связи. Однако активности предприятия в социальной сети практически нет – публикуется 1–2 поста в год при условии, что за последние два года публикаций вовсе не было. Это огромная ошибка для такого немалого предприятия, т. к. оно теряет некоторую часть потенциальных покупателей.

Для увеличения активности подписчиков ОАО «Ольса» в социальных сетях предлагается активное ведение официальной страницы ВК. В данной социаль-

ной сети есть две уникальные возможности – добавить каталог продукции с актуальными ценами и запустить таргетированную рекламу, что позволит увеличить заинтересованность товаром и конкретизировать целевую аудиторию.

Табл. 1. Оценка активности предприятия в социальных сетях

Параметр	Социальная сеть		
	Инстаграм	ВК	Telegram
Количество подписчиков:			
значение, чел.	424	143	457
балл	4	2	5
Среднее количество лайков на одну публикацию:			
значение, раз	24	4	1
балл	5	1	1
Среднее количество репостов на одну публикацию:			
значение, раз	0	1	0
балл	0	5	0
Среднее количество комментариев на одну публикацию:			
значение, раз	1	1	0
балл	5	5	0
Частота обновления ленты:			
значение, раз в месяц	6	0	108
балл	1	0	5
Наличие и полнота контактной информации, балл	5	3	0
Наличие и удобство обратной связи, балл	5	3	0
Качество контента, балл	5	0	4
Разнообразие контента, балл	3	0	5
Сумма баллов	33	19	20

Вторым предложением является проведение рекламных акций по типу «Репост – скидка» в Инстаграм. Участники, размещая на своих страницах рекламу предприятия, значительно увеличат просмотры аккаунта.

Третье предложение – создание аккаунта ОАО «Ольса» в ТикТок. Данная платформа довольно быстро растет по количеству пользователей. Короткие познавательные видео позволят повысить осведомленность бренда, познакомить людей с продукцией предприятия. Также важно отметить, что в ТикТок довольно легко набрать большое количество подписчиков, которые довольно активно реагируют на публикации лайками, репостами и комментариями.

УДК 339.178

## ОЦЕНКА СИЛЬНЫХ И СЛАБЫХ СТОРОН ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ

О. А. ПИЧУГОВА, А. С. МИХАЛЬЦОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

ОАО «Ольса» – металлообрабатывающее предприятие, ориентированное на выпуск товаров мебельной группы для организации отдыха и кемпинга.

Был проведен анализ сильных и слабых сторон качелей садовых ОАО «Ольса» (модель «Варна») и конкурентов-аналогов ЗАО «Авангард» (модель «Бари») и ООО «Мебек» (модель Toscana). Результаты анализа представлены на рис. 1.

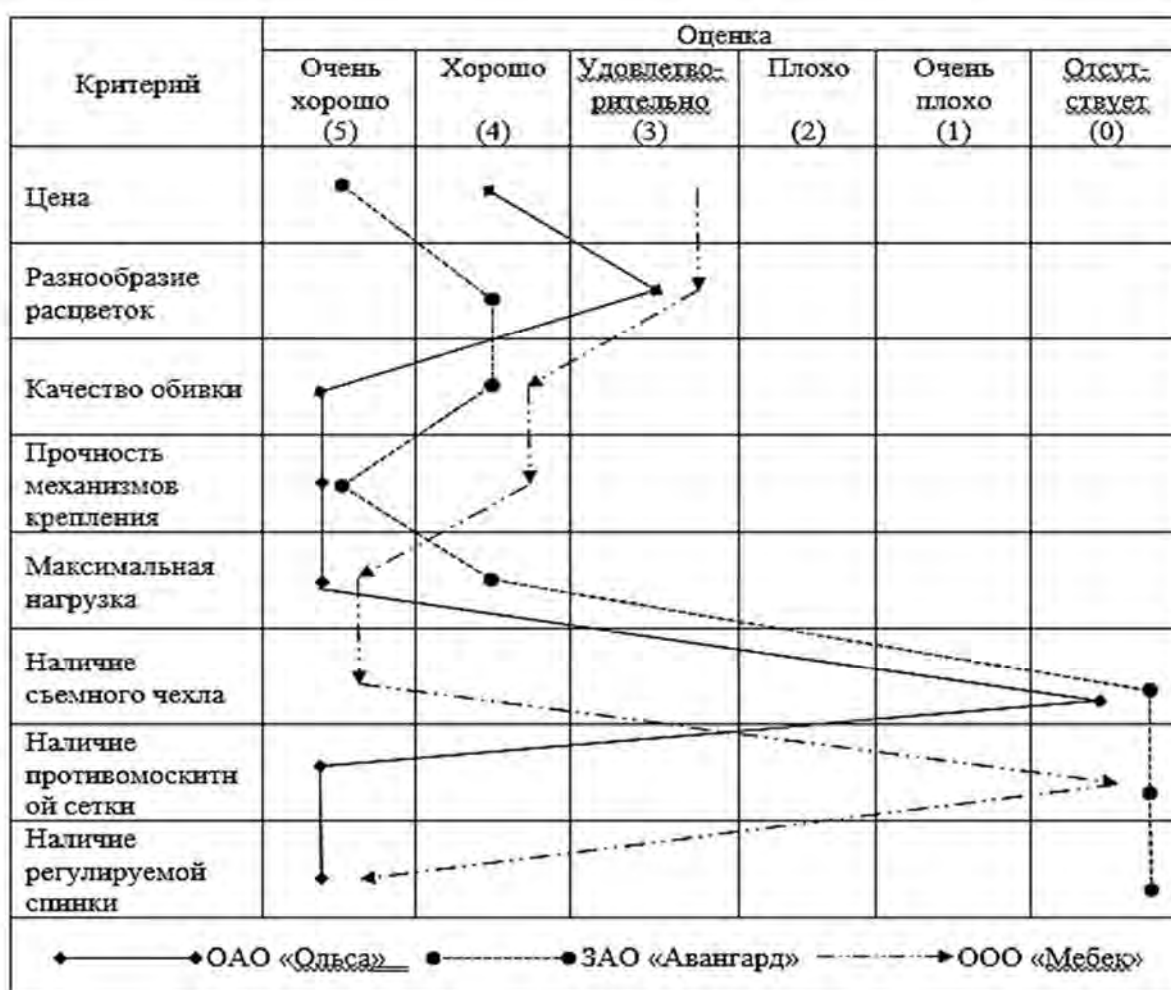


Рис. 1. Анализ сильных и слабых сторон качелей садовых ОАО «Ольса» и конкурентов

По результатам исследования продукция ОАО «Ольса» является конкурентоспособной. Однако предприятию следует добавить в комплектацию бюджетной линейки качелей съемные чехлы для мягкой обивки и увеличить количество расцветок. Также можно рассмотреть использование уличных тканей, которые не пропускают воду, легко чистятся и устойчивы к воздействию солнечных лучей.

УДК 338

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ СОКРАЩЕНИЯ ИЗДЕРЖЕК

Т. В. ПУЗАНОВА, И. Р. МАРЧЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В условиях современного динамичного бизнес-мира, где конкуренция непрерывно усиливается, снижение издержек на производство становится вопросом крайне актуальным и стратегически важным для предприятий любого масштаба. Актуальность проблемы снижения издержек в производстве обусловлена не только стремительными изменениями в рыночной среде, но и постоянным ростом требований к качеству продукции и уровню сервиса.

Одним из значимых промышленных предприятий Республики Беларусь является ОАО «Могилевхимволокно», занимающее ведущие позиции в производстве диметилтерефталата, полиэфирного гранулята ПЭТ, полиэфирных волокон и нитей, синтетических пленок, а также являющееся основным поставщиком сырья для легкой промышленности.

На основе проведенного анализа динамики ключевых показателей финансово-хозяйственной деятельности данной организации с 2020 г. по 2022 г. выявлено, что рост выручки на 31,9 % к 2021 г. сменился снижением до 108,2 % к 2022 г., при этом себестоимость продукции увеличилась на 27,1 % и 11,09 % соответственно. Превышение роста себестоимости над выручкой в 2022 г. привело к убыткам в размере 12 333 тыс. р., а следовательно, и отсутствию чистой прибыли, которая необходима для развития предприятия. Это указывает на наличие финансовых проблем, требующих пересмотра стратегий управления издержками и ресурсами. Анализ динамики показателей рентабельности ОАО «Могилевхимволокно» представлен в табл. 1.

Табл. 1. Анализ динамики показателей рентабельности предприятия

Показатель	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Отклонение 2020/2021 гг., %	Отклонение 2021/2022 гг., %
Рентабельность продаж, %	-2,6	1,1	-1,5	3,7	-2,6
Рентабельность затрат, %	-2,6	1,2	-1,5	3,8	-2,7
Рентабельность производства, %	0,8	4,6	1,6	3,8	-3,0
Рентабельность активов, %	11,9	1,0	-120,1	-10,9	-121,1
Рентабельность собственного капитала, %	19,3	1,5	-160,0	-17,9	-161,5

На основе анализа показателей рентабельности компании за период 2020–2022 гг. можно сделать вывод о значительном снижении эффективности деятельности предприятия в 2022 г., ухудшении использования капитала и оборотных средств. Такое положение предприятия свидетельствует о значительном повышении актуальности решения задач по планированию и управлению ограниченными ресурсами, расходами и производственными процессами.

Несмотря на текущее положение на предприятии, ОАО «Могилевхимволокно» нуждается в осуществлении инвестиционной деятельности с целью внедрения современного технологического и специального оборудования, расширения ассортимента и увеличения объема производства, что позволит улучшить использование ограниченных ресурсов и сократить издержки.

Анализ структуры сметы затрат предприятия на производство в 2022 г. показал, что производство является материалоемким, а удельный вес материальных затрат в нем составляет 81,66 %. Для конкретизации проблемы управления материальными ресурсами проведем анализ их структуры, который показал, что около 30 % составляют затраты на топливно-энергетические ресурсы в составе материальных затрат. Это позволяет охарактеризовать производство на данном предприятии не только как материалоемкое, но и как энергоемкое. При этом объем потребления тепловых ресурсов составил в целом за 2022 г. 608 076 Гкал, из них самостоятельно произведено 201 983 Гкал, а 406 093 Гкал тепловой энергии предприятию поступило из районных энергоисточников. В связи с этим приобретают актуальность инициативы, направленные на сокращение расходов различных видов энергии, в том числе и тепловой энергии. Очевидно, что себестоимость производства теплоэнергии ниже, чем затраты на ее приобретение со стороны.

Рассматривается мероприятие по установке теплосчетчиков Карат-компакт-201-МБ-15-1,5-ПТ на пяти производствах ОАО «Могилевхимволокно». Статистические данные по использованию указанного вида счетчика позволяют сделать вывод, что данный прибор помогает экономить от 10 % до 40 % тепловых ресурсов, а значит, дает возможность предприятию закупать меньшее количество дорогостоящих теплоресурсов со стороны. При оценке эффективности данного мероприятия учитывалось, что стоимость одного теплосчетчика составляет 6 195 р., установка одного теплосчетчика обойдется в 100 р., а объем потребляемой тепловой энергии будет не менее потребленной в 2022 г.

В табл. 2 приведен результат расчета экономической эффективности установки теплосчетчиков при условии достижения минимального уровня экономии в 10 %.

Табл. 2. Результат расчета экономической эффективности мероприятия

Показатель	Результат
Затраты на реализацию мероприятия, р.	31 475
Потребление тепловой энергии без мероприятия в 2022 г., Гкал	608 076
Потребление тепловой энергии после мероприятия, Гкал	547 268,4
Экономия тепловой энергии в натуральном выражении, Гкал	60 808
Экономия тепловой энергии в стоимостном выражении, тыс. р.	8 794,15
Тариф, р./Гкал	144,6274

Внедрение предложенного мероприятия не только экономически оправдано, т. к. экономия от него может составить 8 794,15 тыс. р., но и уменьшает зависимость от государственных энергоснабжающих структур, становясь ключевым шагом в повышении устойчивости и эффективности предприятия.



УДК 657.6

## КОНТРОЛЬ КАК ОСНОВНАЯ ФУНКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ

Т. В. РОМАНЬКОВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Одним из элементов мониторинга транспортной системы региона является государственное региональное управление. Оно осуществляется на основании реализации следующих функций: контроль, планирование, анализ, учет, организация и регулирование.

Функция контроля занимает особое положение среди основных функций государственного регионального управления транспортной системой, т. к. в результате ее осуществления:

- 1) устанавливается степень отклонения фактических показателей от запланированных;
- 2) вносятся изменения в планы и программы развития транспортной системы региона;
- 3) выявляются причины невыполнения плановых показателей;
- 4) оценивается эффективность деятельности: транспортных подразделений промышленных, строительных, торговых и иных организаций; транспортных организаций; транспортной системы в целом.

Контроль, осуществляемый за деятельностью транспорта региона, имеет сложную структуру и представлен следующими направлениями и видами.

1. Отслеживание транспортных средств (ТС), перемещаемых по территории региона в реальном времени.
  - 1.1. Контроль передвижения транспорта в режиме онлайн.
  - 1.2. Контроль скоростного режима ТС.
  - 1.3. Контроль стоянки и остановки ТС.
  - 1.4. Контроль выезда/приезда ТС в запланированные места.
  - 1.5. Контроль перемещения ТС по маршрутам.
2. Отслеживание потребления топлива ТС в регионе.
  - 2.1. Фактическое потребление топлива ТС.
  - 2.2. Контроль мест заливок ТС.
3. Отслеживание параметров и показателей ТС, транспортной системы региона.
  - 3.1. Контроль технических параметров ТС.
  - 3.2. Контроль технико-экономических показателей ТС.
  - 3.3. Контроль достижения плановых показателей транспортной системы региона.

Применение всех видов контроля в совокупности позволит повысить эффективность деятельности транспортных организаций и транспортной системы региона, оптимизировать затраты, достичь плановых и стратегических показателей деятельности.

УДК 332.1

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Т. В. РОМАНЬКОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Регулирование деятельности транспортных организаций, образующих транспортную систему, осуществляется государственными органами на основе использования следующих форм:

1) нормативно-правовое регулирование, предполагающее разработку нормативно-правовых актов по вопросам организации и оказания транспортных услуг. Для его оценки предлагается рассчитывать коэффициент нормативно-правового регулирования, который учитывает как обновление нормативно-правовых актов, происходящее под влиянием предложений, жалоб и заявлений, связанных с их применением, так и изменение доли штрафов за несоблюдение нормативно-правовых актов транспортными организациями;

2) налоговое регулирование, направленное на разработку и обоснование видов налогов, налоговых ставок, понижение или повышение общего уровня налогообложения транспортных организаций региона. Оценить функцию налогового регулирования предлагается коэффициентом налоговых поступлений от транспортной системы региона;

3) лицензионное регулирование, т. е. ключевым элементом региональной транспортной системы являются транспортные организации различных форм собственности. Выдача или запрет разрешений (лицензий) на оказание транспортных услуг осуществляется государственными органами. Оценить лицензионное регулирование предлагается индексом изменения (роста/снижения) выданных разрешений на оказание транспортных услуг;

4) финансовое регулирование, предполагающее принятие мер по:

– распределению и перераспределению финансовых ресурсов между элементами транспортной системы (транспортная инфраструктура региона; транспортные предприятия, действующие в регионе);

– привлечению инвестиций в развитие региональной транспортной системы. Оценить реализацию данной формы госрегулирования предлагается путем расчета индекса изменений долей дотаций транспортным организациям региона, финансовых вложений в развитие транспортной отрасли региона и иностранных инвестиций, привлеченных в транспортную отрасль региона;

5) тарифное регулирование, направленное на установление обоснованных тарифов для перевозки пассажиров и грузов. Его уровень предлагается установить на основе расчета индекса изменения цен (тарифов) на перевозку пассажиров и грузов.

Таким образом, уровень госрегулирования транспортной системы региона рассчитывается как комплексный показатель по среднегеометрической величине.

УДК 624.01:338

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Л. А. СИВАЧЕНКО<sup>1</sup>, Г. М. АБДУКАЛИКОВА<sup>2</sup>, М. К. КУДАЙКУЛОВ<sup>3</sup><sup>1</sup> Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

<sup>2</sup> Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева

Астана, Казахстан

<sup>3</sup> Кыргызско-Российский Славянский университет имени Б. Н. Ельцина

Бишкек, Кыргызстан

Существующие тенденции развития мировой экономики позволяют считать, что определяющую роль в этом играет машиностроение, которое в связи с ускорением технического прогресса, увеличением объема и номенклатуры производимых продуктов, истощением сырьевых ресурсов и негативными экологическими факторами требует проведения его структурной трансформации. В качестве одного из важнейших направлений здесь можно считать ускоренное развитие технологического машиностроения (ТМ).

Согласно [1], в состав технологического машиностроения входят отрасли: строительно-дорожное, грузоподъемное, тракторное, лесозаготовительное, горнодобывающее и коммунальное машиностроение. Понимание собственно ТМ заключается в том, что наиболее представительным и определяющим в качестве такового следует считать межотраслевой комплекс технологий и оборудования, связанных с глубокой переработкой сырья и материалов и получением продуктов самого широкого назначения [2].

Особой отличительной чертой этого сегмента промышленного производства являются огромные издержки и сложность технического исполнения, связанные с большим количеством используемого оборудования и необходимостью выполнения сложных изыскательских, проектных, технологических, исследовательских, пуско-наладочных и других работ. Это, в частности, оборудование для цементных, горнорудных и химических производств, технологии и аппараты для получения материалов с особыми свойствами, лекарственных препаратов, композитов и наноструктурных материалов, боеприпасов и др. Без преувеличения можно сказать, что это всеобъемлющая часть материального производства в любой из стран начиная с древних времен.

Анализ состояния технологической среды показывает устойчивый переход используемых человеком орудий труда, т. е. машин, оборудования и их комплексов, от простых к более сложным, обеспечивающим направленное изменение свойств перерабатываемых материалов и получение продуктов с заданными свойствами при максимальной эффективности и минимальных затратах [3]. Заслуживает быть отмеченным тот факт, что архаичная сфера производства, связанная с сырьевыми технологиями и первичными стадиями процессов и являющаяся ахиллесовой пятой человечества, все явственнее

означает неизбежность форсированного развития и системной модернизации этих областей промышленности. Из сказанного следует, что сырьевые и слаборазвитые переделы производства в ближайшем будущем в составе кластерных образований будут сближаться по своему уровню с более развитыми отраслями, а по многим направлениям и срачиваться с ними [3]. Такой путь развития представляется чрезвычайно актуальным с экономической точки зрения.

Наиболее важные показатели экономической эффективности технологического машиностроения будут заключаться в следующем.

1. Замещение значительной части импортной продукции путем освоения производства отечественными производителями.

2. Создание новых технологий и производств, основанных на собственных разработках.

3. Расширение объемов экспорта производимой машиностроительной продукции.

4. Повышение общего технологического уровня национальной экономики.

5. Улучшение экологической и социальной ситуации.

В качестве заключения следует отметить, что применительно к странам ЕАЭС развитие технологического машиностроения требует мобилизационных подходов, которые необходимы не только для сокращения отставания от передовых стран, но и для создания оптимальных условий в части разработки и освоения производства принципиально новых технологий и оборудования. Некоторые положения интенсификации этих процессов изложены в [4], а их практическая реализация зависит только от принятия соответствующих управленческих решений.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Николаев, С. Н.** Об интенсивном развитии технологического машиностроения на основе качества / С. Н. Николаев // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 5. – С. 3–9.

2. **Сиваченко, Л. А.** Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 254 с.

3. Технологическое машиностроение и его роль в повышении эффективности производства и его индустриализации / Л. А. Сиваченко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 63–72.

4. **Абдукаликова, Г. М.** Основные вопросы начального этапа создания нового технологического оборудования в странах ЕАЭС / Г. М. Абдукаликова, Л. А. Сиваченко, М. К. Кудайкулов // Энергосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород, 2023. – С. 9–13.

УДК 658.511.2

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ В ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРАХ

О. А. СИДОРКИНА, М. В. СЛОБОЖАНИНОВА, Ю. В. КАРАЕВА

Институт энергетики и перспективных технологий

ФИЦ «Казанский научный центр РАН»

Казань, Россия

В настоящее время идет развитие технологий, позволяющих заменить нефтехимические продукты экологически чистыми аналогами, полученными из биомассы [1]. Следует отметить, что древесная биомасса благодаря своему сырьевому потенциалу имеет особое значение. Пиролиз древесины является технологией, в которой путем термохимической конверсии можно получить жидкие, твердые и газообразные продукты.

Использование жидких продуктов пиролиза древесины способствует снижению воздействия на окружающую среду [2]. Это может уменьшить затраты на соблюдение экологических норм и стандартов, что важно в условиях растущего интереса общества к экологии.

Жидкие продукты пиролиза могут быть более экологически безопасной альтернативой по сравнению с классическим модификатором – дибутилфталатом (ДБФ). В отличие от некоторых фталатов, пиролизная жидкость (ПЖ) обладает лучшими характеристиками, что может быть важно для производителей, стремящихся к соблюдению стандартов безопасности продукции. Так, жидкие продукты термохимической переработки древесных отходов обладают биоразлагаемыми свойствами, способствуя естественному разложению в окружающей среде. ДБФ медленно разлагается в окружающей среде, что может привести к его накоплению в почве, воде и растениях, тем самым оказывая токсическое воздействие на различные виды организмов. Также дибутилфталат может присутствовать в воздухе в результате испарения, что может повлечь за собой его дальнейшее распространение в окружающей среде.

Расчет затрат на сырье при производстве представлен в ценах на 2022 г. (табл. 1), где производится сравнение двух рецептур: классической (с модификатором – ДБФ) и комплексной (с частичной заменой классического модификатора на смолистую часть пиролизной жидкости в соотношении 50:50).

Рецептура 1 – классическая: ЭД-20 (80 м. ч.) + ДБФ (20 м. ч.).

Рецептура 2 – комплексная: ЭД-20 (80 м. ч.) + ДБФ (10 м. ч.) + ПЖ (10 м. ч.).

Связующее – эпоксидно-диановая смола ЭД-20.

Модификатор 1 – ДБФ.

Модификатор 2 – ПЖ, полученная в результате термохимической переработки древесных отходов.

Отвердитель – полиэтиленполиамин.

Табл. 1. Расчет затрат на сырье при производстве эпоксидных полимеров

Рецептура	Экономический показатель	Связующее	Модификатор 1	Модификатор 2	Отвердитель
Рецептура 1	Цена за единицу, р.	850	550	0	822
	Сумма за 1 т продукции, р.	653 650	84 700	0	63 294
	Итого	801 644			
Рецептура 2	Цена за единицу, р.	850	550	18	822
	Сумма за 1 т продукции, р.	653 650	42 350	1386	63 294
	Итого	760 680			

Использование классического модификатора 1 в сочетании с модификатором 2 (рецептура 2) целесообразно. Экономия при производстве 1 т эпоксидного полимера составит 40 964 р., т. е. будет снижена ее себестоимость. Следует отметить, что применение жидких продуктов пиролиза древесины характеризуется экономической целесообразностью и может быть стратегическим шагом в сторону устойчивого и более экологически безопасного производства полимерных материалов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol-formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized lignocellulose biomass / A. I. Valiullina [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2021. – Vol. 13. – P. 1–9.

2. **Сидоркина, О. А.** Использование возобновляемого сырья в эпоксидных материалах как экологичная альтернатива нефтехимическим продуктам / О. А. Сидоркина, М. В. Слободжанинова, Е. Е. Лучкина // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Нац. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, Тюмень, 20–22 дек. 2023 г. – Тюмень, 2023. – С. 238–240.

УДК 339.178

## МНОГОМЕРНЫЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ САЙТОВ КОНКУРЕНТОВ ОАО «БУМАЖНАЯ ФАБРИКА «СПАРТАК»

М. А. СИНИЦА, К. П. БАРАНОВСКАЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одним из способов анализа конкурентоспособности предприятий является многомерный сравнительный анализ. Он поможет понять, сайт какого предприятия является ведущим среди сайтов предприятий-конкурентов.

В качестве конкурентов для ОАО «Бумажная фабрика «Спартак» были выбраны следующие предприятия: УП «Бумажная фабрика» Гознака, ОАО «Добрушская бумажная фабрика «Герой труда», Бумажная фабрика «Красная звезда» ОАО «Светлогорский ЦКК». Исходные данные для сравнительного анализа конкурентоспособности сайтов перечисленных конкурентов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Исходные данные для сравнительного анализа конкурентоспособности сайтов

Предприятие	Показатель				
	Ди- зайн	Удобство ис- пользования сайта и дос- тупность информации	Актуальность и полезность информации для пользова- теля	Обратная связь	Соответствие содержания сайта его назначению
ОАО «Бумажная фабрика «Спартак»	4	5	5	5	5
УП «Бумажная фабрика» Гознака	3	5	5	4	5
ОАО «Добрушская бумажная фабрика «Герой труда»	5	5	5	4	5
Бумажная фабрика «Красная звезда» ОАО «Светлогорский ЦКК»	4	4	5	5	5
Весовой коэффициент К	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2

В табл. 1 в каждой графе необходимо определить максимальный элемент, который принимается за единицу. Далее все элементы этой графы делятся на максимальный элемент. В результате создается матрица стандартизированных коэффициентов, представленных в табл. 2.

Расчет рейтинговой оценки конкурирующих сайтов выглядит следующим образом:

$$R1 \text{ («Спартак») } = 0,3 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,1 \cdot 1^2 + 0,2 \cdot 1^2 = 0,892;$$

$$R2 \text{ («Гознака») } = 0,3 \cdot 0,6^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,1 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 1^2 = 0,772;$$

$$R3 \text{ («Герой труда») } = 0,3 \cdot 1^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,1 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 1^2 = 0,964;$$

$$R4 \text{ («Красная звезда») } = 0,3 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 0,8^2 + 0,2 \cdot 1^2 + 0,1 \cdot 1^2 + 0,2 \cdot 1^2 = 0,82.$$

Табл. 2. Матрица стандартизированных коэффициентов

Бренд	Показатель/балл				
	Ди- зайн	Удобство использования сайта и доступ- ность инфор- мации	Актуальность и полезность информации для пользователя	Обрат- ная связь	Соответствие содержания сайта его назначению
ОАО «Бумажная фабрика «Спартак»	0,8	1	1	1	1
УП «Бумажная фабрика» Гознака	0,6	1	1	0,8	1
ОАО «Добрушская бумажная фабрика «Герой труда»	1	1	1	0,8	1
Бумажная фабрика «Красная звезда» ОАО «Светлогорский ЦКК»	0,8	0,8	1	1	1
Весовой коэффициент К	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2

Из полученных данных можно сделать вывод, что из представленных предприятий лидирующую позицию занимает сайт ОАО «Добрушская бумажная фабрика «Герой труда».

Второе место занимает сайт ОАО «Бумажная фабрика «Спартак».

Третье и четвертое места – сайты Бумажная фабрика «Красная звезда» ОАО «Светлогорский ЦКК» и УП «Бумажная фабрика» Гознака соответственно.

Данные показывают, что сайт ОАО «Бумажная фабрика «Спартак» проигрывает по показателю «дизайн». Это означает, что необходимо обратить внимание на оформление сайта: использовать один и тот же шрифт для написания текста; правильно расставить заголовки страниц; сделать надписи в едином стиле; заменить цветовую палитру сайта; выполнить перелинковку страниц, чтобы сайт стал удобным для просмотра, а пользователи могли легко ориентироваться на нем; добавить на главную страницу награды и достижения, чтобы пользователи видели развитие и рост предприятия. Выполнение этих рекомендаций позволит придать сайту современный внешний вид и сделать его более конкурентоспособным.



УДК 339.178

## ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ САЙТА ОАО «БУМАЖНАЯ ФАБРИКА «СПАРТАК»

М. А. СИНИЦА, К. П. БАРАНОВСКАЯ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Наиболее результативным для оценки конкурентоспособности сайтов предприятий является один из видов рейтинговой оценки – балльный метод, который достаточно точно определяет место ОАО «Бумажная фабрика «Спартак» (табл. 1).

Табл. 1. Оценка конкурентоспособности сайта ОАО «Бумажная фабрика «Спартак»

Критерий	Оценка, балл			
	ОАО «Бумажная фабрика «Спартак»	УП «Бумажная фабрика» Гознака	ОАО «Добрушская бумажная фабрика «Герой Труда»	Бумажная фабрика «Красная звезда» ОАО «Светлогорский ЦКК»
Дизайн	4	3	5	4
Удобство использования сайта и доступность информации	5	5	5	4
Актуальность и полезность информации для пользователя	5	5	5	5
Обратная связь	5	4	4	5
Соответствие содержания сайта его назначению	5	5	5	5

На рис. 1 представлен многоугольник конкурентоспособности сайтов производителей бумажной продукции в Республике Беларусь.

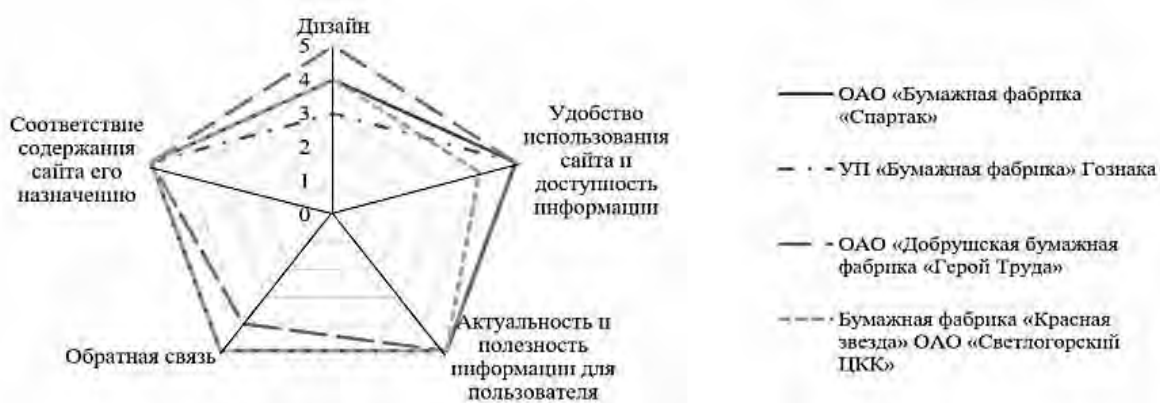


Рис. 1. Многоугольник конкурентоспособности производителей бумажной продукции

Сайт ОАО «Бумажная фабрика «Спартак» является одним из лидеров по всем критериям, кроме дизайна. Следовательно, необходимо сделать упор на оформлении. Например, использовать гармоничные цвета, читаемый шрифт, современные технологии, т. е. сделать сайт современным и удобным

УДК 669.018

## ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

К. А. ТОКМЕНИНОВ

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Качество продукции является одним из основных показателей, обеспечивающих ее конкурентоспособность, спрос потребителей и сбыт. Безусловно, следует учитывать, что высокое качество продукции должно обеспечиваться одновременно с конкурентоспособной ценой.

Не случайно 2024 г. в Республике Беларусь объявлен годом качества. Далее представлены основные направления формирования и последующего обеспечения выпуска качественной промышленной продукции.

Следует отметить, что обеспечение качества при освоении нового вида продукции на предприятии и при серийном производстве имеет свои особенности. Для вновь осваиваемой продукции необходимо реализовать выполнение всех этапов так называемой «петли качества» на этапе НИР, ОКР и эксплуатации.

Особое внимание следует уделить полноценной опытно-конструкторской отработке с использованием современных методик, приборов и оборудования для экспериментальной отработки продукции. Это позволяет существенно снизить затраты на последующую доработку продукции, которая не прошла полноценную отработку на этапе ОКР. Проблемы у такой продукции могут выявиться на этапе реальной эксплуатации.

При разработке программ испытаний конкретной осваиваемой продукции необходимо использовать типовые методики, которые позволяют учесть все основные факторы, влияющие на качество продукции.

Примером может служить необходимость проведения климатических испытаний. Некоторые материалы теряют свои первоначальные свойства под воздействием климатических факторов: перепада температур, воздействия влажности и др. Аналогично климатические факторы влияют на некоторые покрытия. Подтверждением того, что ресурс изделия будет обеспечен в течение всего заявленного срока эксплуатации, служат результаты климатических испытаний. Например, для подтверждения сохранения защитных свойств нанесенного покрытия в течение 10 лет необходимо провести ускоренные климатические испытания за 0,5 года, которые имитируют воздействие климатических факторов десятилетнего периода. Имеющиеся методики указывают, что в Республике Беларусь климат является умеренно-холодным. Для него существующие методики ускоренных климатических испытаний рекомендуют температуру и влажность, которые позволяют имитировать реальные условия эксплуатации, но за значительно более короткий срок.

При серийном производстве продукции необходимо соблюдение определенного алгоритма действий для обеспечения высокого качества продукции.

При закупке и приемке на склад исходных для производства продукции материалов и комплектующих обязательным должен быть их входной контроль качества, который осуществляется на основании сопроводительных документов. При необходимости может быть проведен контроль в заводской лаборатории.

Следует отметить, что на этапе закупки исходных материалов желательно согласование документов на закупку, оформляемых службой снабжения, с разработчиками конструкторской документации, которые обеспечивают выбор материалов на этапе ее разработки.

В процессе производства продукции необходим контроль соответствия изготавливаемой продукции требованиям конструкторской документации (КД). Его осуществляет отдел контроля качества (ОТК). Желательно, чтобы был обеспечен пооперационный контроль качества изготавливаемой продукции. Это позволяет снизить затраты на случай брака на промежуточном этапе изготовления.

В связи с тем, что для контроля используются приборы и мерительный инструмент, должна быть организована их метрологическая поверка в соответствии с установленным регламентом.

В процессе производства могут выявиться неточности в КД или необходимость замены материала. На этот случай должна быть разработана процедура проведения указанных операций с указанием порядка внесения уточнений или изменений в КД, с детализацией функций вплоть до исполнителей.

Основные параметры качества продукции и до 60 %...70 % производственных затрат закладываются на этапе разработки конструкторской документации. Это связано с выбором материалов, покрытий, конструктивного выполнения узлов изделия и т. д. Для обеспечения высокого уровня качества необходимо, чтобы новая продукция не уступала по своим параметрам инновационной продукции конкурентов. Можно рекомендовать определять качество продукции путем установления ее технического уровня. Для этого проводится патентно-информационный поиск аналогов осваиваемой продукции. Глубина поиска на современном этапе развития промышленности рекомендована пять лет. Наиболее эффективным методом оценки технического уровня и качества соответственно может быть рекомендована методика комплексной либо в отдельных случаях смешанной оценки технического уровня продукции.

Следует отметить, что объективность и эффективность определения технического уровня и качества продукции в значительной степени зависит от выбора параметров для сравнения с аналогом и уровня весомости выбранных параметров. Этот этап обоснования технического уровня осуществляется с привлечением квалифицированных экспертов. При определении весомости сравниваемых параметров целесообразно использовать существующий стандарт, которым рекомендованы основные параметры промышленной продукции в порядке убывания их значимости. Результатом сравнения оцениваемой продукции с базовой будет коэффициент, который позволяет установить ее качество.

УДК 332.142.6

## ВКЛАД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА

А. В. ШАДРАКОВ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Промышленный комплекс играет важнейшее значение в социально-экономическом развитии Могилевской области. В 2022 г. в регионе насчитывалось 1573 организации промышленности, в структуре валового регионального продукта (ВРП) вклад промышленности составлял 32,0 %, по итогам 2015 г. – 30,2 %. За период 2015–2022 гг. удельный вес Могилевской области в республиканском объеме промышленного производства вырос с 8,6 % до 9,2 % [1].

Эффективная работа промышленных предприятий области вносит вклад в достижение глобальных Целей устойчивого развития (далее – ЦУР), основных положений Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 г., а также приоритетов реализации стратегии устойчивого развития Могилевской области до 2035 г. (далее – СУР-2035).

В СУР-2035 в качестве стратегической цели развития промышленного комплекса региона на период до 2035 г. обозначено построение конкурентоспособного инновационного комплекса, оперативно и гибко реагирующего на мировую рыночную конъюнктуру, а также потребности внутреннего рынка.

Ожидаемыми результатами являются: рост производительности труда по добавленной стоимости в промышленности до 25 тыс. долл. США на одного среднесписочного работника в 2035 г.; ежегодное снижение затрат на производство на уровне 1,5 %...2 %; увеличение удельного веса экспорта в объеме промышленного производства до 55 % в 2035 г.

Достижению поставленной цели будет способствовать реализация двух стратегических задач, обозначенных в СУР-2035: «Переход к циркулярной экономике» и «Цифровая трансформация развития» [2].

В реализацию СУР-2035 вовлечены ряд промышленных предприятий Могилевской области (ИООО «ВМГ Индустри», ОАО «Моготекс», ОАО «Эковер ПРО»), подписавших декларации о присоединении к достижению ЦУР.

В 2022 г. в рамках разработки и реализации плана перехода Могилевской области к циркулярной экономике на период до 2025 г. в качестве пилотного предприятия для тестирования циркулярных бизнес-моделей определено ИООО «ВМГ Индустри».

На данном предприятии в результате реализации проекта по модернизации системы аспирации все отходы от производства мебели направляются на повторное использование в производство древесно-стружечных плит.

Важным фактором повышения устойчивости развития промышленных предприятий Могилевской области является переход к стратегическому планированию, способствующему внедрению кооперативных связей, кластерного подхода, промышленного симбиоза и других видов сотрудничества на отраслевом и территориальном уровнях.

Основное предназначение стратегии устойчивого развития промышленного предприятия заключается в:

- концентрации усилий на реализации ключевых приоритетов развития организации;
- повышении эффективности использования имеющихся ресурсов, вовлечении скрытых резервов развития;
- создании и продвижении позитивного имиджа, формировании инвестиционной привлекательности.

Основными этапами разработки стратегии устойчивого развития промышленного предприятия должны стать:

- создание организационной структуры разработки стратегии;
- всесторонняя диагностика работы предприятия;
- выработка видения будущего, приоритетов, стратегических целей;
- определение источников финансирования реализации стратегии;
- мониторинг, оценка, корректировка стратегии.

Перспективными направлениями развития промышленных предприятий Могилевской области в среднесрочной перспективе в рамках реализации второго этапа СУР-2035 – «Десятилетие перехода к устойчивому развитию» – 2024–2030 гг. – должны стать:

- модернизация действующих и создание новых высокоэффективных производственных мощностей;
- внедрение в производство бизнес-моделей циркулярной экономики;
- реализация крупных инвестиционных проектов;
- содействие формированию имеющихся и формирующихся кластеров;
- стабилизация финансового состояния;
- диверсификация рынков сбыта произведенной продукции.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регионы Республики Беларусь. Социально-экономические показатели: стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2023. – Т. 1. – 670 с.
2. **Шадраков, А. В.** Стратегическое планирование перехода промышленного предприятия к развитию циркулярной экономики / А. В. Шадраков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 496–497.

УДК 796.011.3

## РОЛЬ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ В ЖИЗНИ МОЛОДЕЖИ

М. Л. БУДАЕВ, М. Ф. ГРИГОРЬЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Исторически физическая культура формировалась под влиянием потребностей общества в физической подготовке к труду [1].

В современном обществе физическая культура определяется как система, направленная на гармоничное развитие духовных и физических сил человека [2].

Одной из значимых проблем современности является рост заболеваемости, что впоследствии становится причиной снижения общего уровня здоровья. Возможной причиной этого может являться безразличное или отрицательное отношение к занятиям физической культурой.

В период с 2020 по 2022 учебный год было опрошено 20 студентов на I–III курсах обучения.

Было определено отношение студентов различных курсов к занятиям физической культурой (рис. 1).

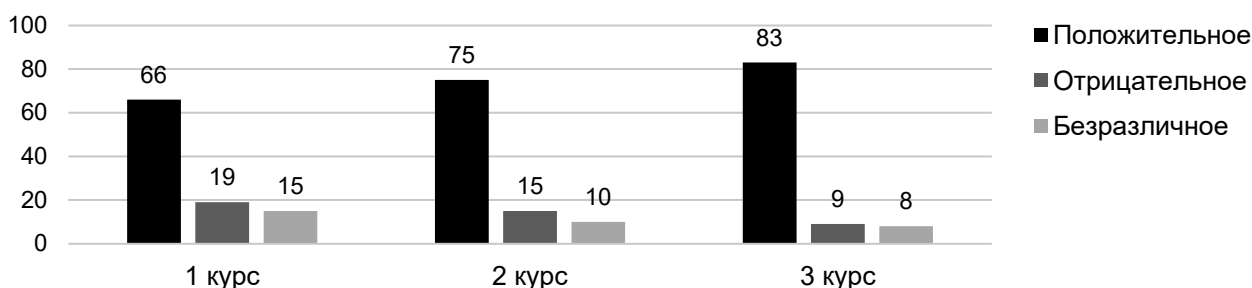


Рис. 1. Диаграмма отношения студентов различных курсов к предмету «Физическая культура»

Согласно опросу, в процессе обучения наблюдается рост интереса к предмету «Физическая культура», который обусловлен всесторонним развитием студентов в процессе обучения.

Физическая культура является важным многофункциональным механизмом оздоровления, самореализации, развития в системе образования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаев, М. Л. Проблема контроля подготовленности армрестлеров / М. Л. Будаев, М. Ф. Григорьев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 460–461.

2. Силовая подготовка в армрестлинге: учебно-методические рекомендации / Сост. М. Л. Будаев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 16 с.

УДК 008.001.14

## РОЛЬ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МЕТОДОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ ГУМАНИТАРНОМ ЗНАНИИ

А. П. ДУБИНИНА  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В современной ситуации социокультурного развития на первый план в объяснении и понимании картины мира выходят отдельные специальные картины миры, определяемые в рамках физической, биологической, космологической стратегий развития. Синергетика выполняет функцию соединения данных картин мира с целью создания единого междисциплинарного пространства, междисциплинарной коммуникации с учётом глобальных изменений, произошедших за последние десятилетия.

Современная синергетика прежде всего рассматривается как наука о самоорганизующихся системах с её понятиями, принципами, методологией. Также следует различать синергетику как совокупность определённых моделей самоорганизации в биологических, химических, социальных, политических, экономических, медицинских, образовательных системах и синергетику как стратегию современных междисциплинарных исследований, в основе которых лежит диалог, взаимное согласие и сотрудничество между представителями различных сфер научного знания. В этом диалоге синергетика делает акцент на объяснении систем с точки зрения их нелинейности, неустойчивости, открытости.

По мнению И. Р. Пригожина и И. Стенгерс, «на всех уровнях, будь то уровень макроскопической физики, уровень флуктуаций или микроскопический уровень, источником порядка является неравновесность. Неравновесность есть то, что порождает «порядок из хаоса». Занимаясь поиском симметрии, мы с удивлением обнаружили на всех уровнях – от элементарных частиц до биологии и экологии – процессы, сопровождающиеся нарушением симметрии. На наших глазах возникает новое единство: необратимость есть источник порядка на всех уровнях. Необратимость есть тот механизм, который создаёт порядок из хаоса» [2, с. 331–332].

Основоположник синергетики Г. Хакен полагал, что синергетика призвана играть роль своеобразной метанауки, которая подмечает и изучает характер закономерностей и зависимостей, которые ранее частные науки считали своими. Итак, синергетическое видение мира осуществляет своего рода синтез стиля мышления постнеклассической науки, классического и неклассического стиля в науке, а также термодинамики, открывшей необратимость физических процессов.

В XX–XXI вв. синергетика изменила мировидение человека и человечества, произошёл сдвиг сознания в сторону такого понимания мира, где важными концептами становятся обратимость и необратимость, детерминизм и случайность, линейность и нелинейность, предсказуемость и непредсказуемость. Сегодня благодаря открытиям синергетики естественный порядок мироздания теперь не является вечным и неизменным, материя не инертна, ей присущи самодвижение и самоорганизация; детерминизм в науке не исключает случайность. Развитие мира в целом многовариантно и происходит по нелинейным законам, а темп и направление развития не заданы, поэтому развитие ориентируется теперь на видоизменение систем, реальный мир управляется не только детерминистскими законами, но и случайностью.

Говоря о роли и значении синергетики в современной науке и миропонимании, следует отметить, что междисциплинарный потенциал синергетики и применение частично математического аппарата обусловили распространение исследовательских стратегий синергетики на различные области гуманитарного знания. Синергетическая методология помогает раскрыть дополнительные причинные связи и обусловленности в происхождении и развитии психики человека, его интеллекта, духовной культуры. Синергетические принципы оказываются действенными при исследовании индивидуального и общественного сознания. По мнению академика В. С. Стёпина, «коренное преобразование научной картины мира на основе достижений термодинамики неравновесных процессов и концепции самоорганизации вносит существенно новые моменты в основания научного поиска и оказывает воздействие на всю современную культуру. Возникают контуры грандиозного научного синтеза знаний о неорганической природе и жизни человека» [1].

Проблематика современной синергетики всё чаще пересекается с проблемами философии, культуры, религии. Благодаря появлению новых синергетических идей в современном духовном развитии происходит переосмысление ранее казавшихся незыблемыми истин, по-новому интерпретируются образы, символы в религии. Особую актуальность сегодня приобретает синергетический подход к проблемам языка и его философскому осмыслению, к проблемам современной межкультурной коммуникации в эпоху глобализации.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стёпин, В. С.** О философских основаниях синергетики [Электронный ресурс] / В. С. Стёпин. – Режим доступа: <http://spkurdyumov.ru/philosophy/o-filosofskix-osnovaniyax-sinergetiki-v-s-stepin/t>. – Дата доступа: 18.01.2024.
2. **Алексеев, П. В.** Хрестоматия по философии: учебное пособие / П. В. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Проспект, 2016. – 574 с.



УДК 908

## О РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «НЕЛЬЗЯ ЗАБЫТЬ! НЕЛЬЗЯ ПРОСТИТЬ»

А. В. КАЗАНСКИЙ, Н. Е. КОРНЕЕВА, Т. В. ПРОТАСОВА

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

В соответствии с Указом № 1 Президента Республики Беларусь А. Г. Лукашенко от 01.01.2022 г. 2022 год был объявлен Годом исторической памяти, целью которого было сохранение героического наследия белорусского народа и систематизация исторических исследований. Противодействию реваншизму и национализму способствует расследование Генеральной прокуратурой уголовного дела по фактам геноцида населения Беларуси во время Великой Отечественной войны. Год исторической памяти завершился, прошел Год мира и созидания, но тематика формирования объективного отношения белорусской молодежи к своему историческому прошлому остается актуальной и сегодня. Именно поэтому в университете реализуется проект «Нельзя забыть! Нельзя простить».

Цель проекта: восстановление хронологии событий, происходивших на территории г. Могилева в годы Великой Отечественной войны.

Задачи:

– обобщение имеющейся информации о событиях, происходивших в годы Великой Отечественной войны на территории г. Могилева, в частности Белорусско-Российского университета (корпусов № 1 и 3) и д. Новое Пашково Могилёвского района;

– поиск архивных документов, фото, видеоматериала, связанных с целью данного проекта;

– установление лиц, причастных к геноциду населения в г. Могилеве и д. Новое Пашково Могилёвского района;

– использование результатов проекта в гражданско-патриотическом воспитании молодёжи.

В ходе реализации проекта выяснено:

– 12 июля 1941 г. штаб народного ополчения г. Могилева создал полк народного ополчения под командованием начальника Школы НКВД майора госбезопасности Н. И. Калугина. В состав полка вошли три батальона: в 1-й входили работники и курсанты школы НКВД; 2-й батальон был укомплектован курсантами школы милиции под командованием капитана К. Г. Владимирова; 3-й батальон под командованием начальника областного

управления НКВД Я. И. Пилипенко состоял из представителей народного ополчения;

– около центрального входа в университет (рядом с местом, где сейчас расположен флагшток) были захоронены два немецких оккупанта. Установлены должность и фамилия одного из них – гауптман Паш, погибший 26 июля 1941 г. при штурме г. Могилева. Можно предположить, что он погиб при захвате учебного корпуса № 1 или прилегающей к нему территории;

– 7 сентября 1941 г. 3-й (322) полицейский батальон полка «Центр» прибыл в г. Могилев и был расквартирован в здании учебного корпуса № 1 университета. Возглавлял батальон майор-полицейский Готлиб Нагель. 22 сентября 1941 г. батальон арестовал в д. Барсуки одного из руководителей обороны г. Могилева, командира 172-й стрелковой дивизии генерал-майора М. Т. Романова. С большой долей вероятности генерал-майор Романов содержался в тюрьме (учебный корпус № 3), которая была в непосредственной близости к месту расположения батальона;

– 2–3 октября 1941 г. батальон участвовал в уничтожении могилёвского гетто. В ходе карательной акции было уничтожено 2208 мужчин, женщин и детей;

– обер-группенфюрер, генерал полиции Эрих фон дем Бах-Зелевский, руководивший уничтожением мирного населения в Республике Беларусь, посещал расположение 3-го полицейского батальона полка «Центр» и лично участвовал в расстрелах;

– на территории учебного корпуса № 1 университета (цокольный этаж со стороны ул. Ленинской) располагался немецкий военный госпиталь.

План дальнейшей реализации проекта предполагает следующее.

1. Поиск документов, относящихся к описанным событиям, в архивах Республики Беларусь, Российской Федерации, Германии, Израиля.

2. Опрос местных жителей д. Пашково и Новое Пашково.

3. Определение мест, где гитлеровцы сжигали останки казненных местных жителей и красноармейцев.

4. Изучение дальнейшей судьбы людей (В. И. Варчука, С. И. Пилунова и др.), участвовавших в описанных событиях.

5. Изучение событий, связанных с арестом и убийством Т. Р. Карпинской и О. Н. Карпинской.

6. Разработка проекта размещения памятника с привязкой на местности, определением оптимальной трассы автомобильной дороги к памятнику.

7. Публикация статей, монографии.

УДК 364-785

СОЦИОКУЛЬТУРНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА КАК ФАКТОР  
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗАД. А. КАНАШЕВИЧ<sup>1</sup>, Н. М. КАНАШЕВИЧ<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусско-Российский университет<sup>2</sup>Могилевский институт МВД Республики Беларусь  
Могилев, Беларусь

Глобальные вызовы, связанные с переходом мировой экономики к новому технологическому укладу, коренным образом трансформируют институт высшего образования, что стимулирует рассмотрение базовых изменений в деятельности учреждений высшего технического образования, которые должны способствовать формированию профессиональных и социально-личностных компетенций специалистов для практической деятельности в условиях «Индустрии 4.0». Происходящие в мировом образовательном пространстве трансформации направлены на создание условий, которые, как отмечается в Концепции развития системы образования Республики Беларусь до 2030 года, отвечают потребностям формирования «высококвалифицированных кадров с перспективными универсальными компетенциями», способных самостоятельно принимать ответственные решения в ситуации выбора, умеющих работать в команде, гибко адаптироваться к изменениям.

Привлекательность лучших университетов мира сегодня задается не только состоянием их материальной базы, качеством преподавательского состава и студенческого контингента, но также характером организации образовательного пространства и всем образом жизни академического сообщества, что в нашем общественном сознании называют социокультурной образовательной средой. Подтверждением значимости этой проблемы стали работы последнего десятилетия, посвященные изучению процессов формирования и управления социокультурной средой УВО, которая традиционно понималась как совокупность социальных, культурных, а также специально организованных в образовательном учреждении психолого-педагогических условий, в результате взаимодействия которых происходит становление личности будущего специалиста (С. В. Тарасов). Или как такая социальная среда вуза, которая базируется на определенном наборе норм и ценностей, которые будут преломляться во всех элементах: в учебных планах, программах, учебниках, в деятельности преподавателей (М. Н. Филатова).

Отметим, что пока отсутствует общепринятое понимание компонентов и критериев оценки эффективности социокультурной образовательной среды УВО. А это принципиально значимо, исходя из современных требований к профессиональным и социально-личностным компетенциям специалистов. Обращение к профильной литературе свидетельствует, что традиционно акцент делался или на качестве архитектурно-эстетической среды, технических средств обучения, информационных систем и учебной литературы, или на институтах и видах академической деятельности, ее сферах, подсистемах, отделах, число которых различается. Только в последние годы по отношению в деятельности

УВО стало использоваться понятие «имидж» (О. Л. Пуренок, Е. В. Гутникова). Предлагаем учитывать в числе основных компонентов, определяющих функциональность социокультурной среды УВО, следующие.

1. Социальный имидж (статус) УВО, рассматриваемый в двух аспектах:

1) в международном плане – как степень инновационности учебной и научной деятельности; объем и престиж оказываемых образовательных услуг; присутствие в международных рейтингах и организациях; объем и репутация договорных отношений с зарубежными партнерами;

2) с точки зрения характера внутренней корпоративной культуры и солидарности – культура и стиль общения администрации, педагогического коллектива, обслуживающего персонала; лояльность сотрудников и обучаемых к руководству и коллективу; морально-психологический климат; система санкций и стимулирования.

2. Вузовский менеджмент, к области которого относится не только административное и учебно-методическое управление, но и управление: социокультурной средой УВО, включая интерпретацию его миссии (презентация концепции обучения и воспитания, стратегии международной и маркетинговой деятельности); формированием тезауруса ведущих профессионально-ценностных ориентаций академического сообщества и организацией его символического пространства; педагогическим и психологическим сопровождением внеаудиторной работы студентов, в том числе иностранных, используя студенческое самоуправление, другие традиционные и новые формы развития навыков самостоятельной индивидуальной профессиональной и социальной деятельности.

3. Информативно-коммуникативную сферу, играющую особую роль в функционировании социокультурной среды УВО в условиях растущей информатизации и поликультурности образовательного пространства. В этой связи отметим, что в Концепции развития системы образования Республики Беларусь до 2030 года формирование информационно-коммуникационной инфраструктуры УВО рассматривается в связи с цифровизацией образовательного пространства, в аспекте ее ресурсного и нормативного обеспечения. Однако межкультурные коммуникации, как следствие интернационализации учреждений высшего образования и процесса формирования поликультурной образовательной среды, пока не получили нормативного закрепления.

Таким образом, социокультурная среда УВО сегодня должна также целенаправленно проектироваться и формироваться, как и отвечающая духу времени учебно-материальная база учебного процесса. Современная высшая школа все более выступает институтом, несущим ответственность не только за качество получаемых профессиональных знаний, но и за качество человеческого капитала в целом, являющегося для индивида источником творческого развития и получения жизненных благ, для университета – возможностью повышения конкурентоспособности на внутреннем и мировом образовательном рынке, для страны – залогом успешного вхождения в глобальную экономику и устойчивого развития.

УДК 53:378.147

ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ  
В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

О. Е. КОВАЛЕНКО, Т. В. МЕДВЕДСКАЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

При планировании процесса обучения в вузе для очной формы получения высшего образования до 2/3 от общего количества академических часов, предусмотренных на изучение дисциплины, отводятся на самостоятельную работу.

Обычно, при преподавании физики, для самостоятельного изучения выносятся вопросы, которые не были изучены на лекциях. Такой подход не позволяет насытить информацией образовательный процесс, исключает научно-исследовательскую направленность работы. Студент должен научиться самостоятельно планировать и решать профессиональные задачи, проводить поиск информации и получать новые знания и навыки. В связи с этим возникает необходимость грамотной организации и стимулирования самостоятельной работы в образовательном процессе.

Основными проблемами при организации самостоятельной работы в студенческих группах являются слабая мотивация, низкий интерес к процессу получения знаний и овладению будущей специальностью. Наиболее сильной мотивацией к самостоятельному изучению материала является внутренняя потребность в поиске информации. Такую потребность можно стимулировать проблемным изложением материала и организацией работы в малых группах.

Для успешной работы необходимо создавать специальные условия, стимулирующие самостоятельную работу. Например, выдавать индивидуальные задания, организовывать работу над коллективным проектом и т. п. При этом необходимо дифференцированно подходить к подбору заданий с учетом уровня подготовки студента. К тому же, в настоящее время, для организации самостоятельной работы в вузе в распоряжении преподавателя и студента имеется ряд эффективных инструментов, которые позволяют организовать постоянный доступ к необходимой информации. В первую очередь это система дистанционного обучения Moodle, внедренная в учебный процесс Белорусско-Российского университета, доступ к которой студенты могут получать даже при помощи своих мобильных устройств связи. Размещение электронного учебно-методического комплекса дисциплины в системе Moodle способствует эффективной организации и поддержке самостоятельной работы студента.

УДК 796.015.132:004

## ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Е. А. КОПЫЛОВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Тенденция к всеобщей информатизации общества объясняет постоянный рост потребности в специалистах в области автоматизации обработки информации. Специальность «Автоматизированные системы обработки информации» (АСОИ) является одной из самых престижных в Белорусско-Российском университете. Выпускники этой специальности являются специалистами в области системного проектирования, создания, интегрирования, эксплуатации и администрирования программно-аппаратного обеспечения информационных технологий и автоматизированного управления в любых сферах, включая бизнес, экономику и управленческую деятельность.

Этот вид профессиональной деятельности предполагает преимущественно умственный труд, связанный с психофизическими нагрузками, протекающий в условиях малой двигательной активности при длительном сохранении однообразной статической позы. Регулярные нагрузки вызывают напряжение зрительного анализатора, боль в мышцах рук, пальцев, шеи, застойные явления в нижних конечностях. Это приводит к возникновению условий для повышенной утомляемости, снижению работоспособности и негативно может сказаться на здоровье.

Задача преподавателей физической культуры – подготовить студентов к избранной профессии с использованием специальных средств физической культуры и спорта для развития отдельных физических качеств и психофизиологических свойств организма. Эта задача решается с применением профессионально-прикладной физической культуры (ППФК) в системе высшего профессионального образования, являющейся неотъемлемой частью обязательного курса по учебной дисциплине «Физическая культура».

Знание о профессиональных заболеваниях позволяет заранее подобрать комплекс упражнений, выполняя который можно снизить отрицательное влияние профессии на организм студента. ППФК помогает предотвратить профессиональные заболевания и травмы, а также улучшить психофизическое состояние здоровья и работоспособность студентов.

Важным аспектом профессионально-прикладной физической подготовки является индивидуальный подход к каждому студенту, учитывающий его физическую подготовленность. Это позволяет создать оптимальные условия для формирования необходимых психофизических качеств, умений и навыков, которые будут нужны в последующей профессиональной деятельности будущих инженеров по информационным технологиям.

Учебный процесс по профессионально-прикладной физической культуре проводится в форме теоретических и практических занятий. Цель теоретических занятий – дать студентам прикладные знания, необходимые для правильного использования средств физической культуры и спорта в профессиональной деятельности. Знания, полученные на теоретических занятиях, закрепляются на практических занятиях, способствуют самосовершенствованию, укреплению здоровья, развитию двигательных качеств, расширению круга двигательных навыков и повышению функциональных возможностей организма.

Общефизическая подготовка обеспечивает всестороннее и гармоничное развитие человека и является составной частью ППФК. Прикладная физическая подготовка на специальности АСОИ направлена на развитие физических качеств, специфических для избранной профессиональной деятельности.

На практических занятиях для профилактики заболеваний опорно-двигательной системы (сколиоз, остеохондроз и др.) целесообразно выполнять физические упражнения для улучшения осанки, укрепления мышц спины, брюшного пресса, рук, также упражнения для расслабления мышц шеи, затылка, пальцев рук.

Полезны кардиоваскулярные упражнения, которые направлены на улучшение работы сердечно-сосудистой системы и выносливости. Примерами кардиоваскулярных упражнений могут быть бег, активная ходьба, езда на велосипеде, плавание, лыжи. Кардиотренажеры укрепляют мышцы нижних конечностей и спины: эллипсоид, беговая дорожка, велотренажер, степперы.

Развитие гибкости улучшает эластичность мышц, пластичность движений, уменьшает риск получения травмы, снимает нервное напряжение. Укрепляются мышцы спины и туловища, что способствует поддержанию правильной осанки. Упражнения на гибкость тела помогут предотвратить мышечную боль, снять спазмированность, сохранить подвижность суставов, увеличить силу мышц.

Минимизировать неблагоприятное влияние компьютера на зрительную систему можно посредством гимнастики для глаз. Упражнения помогают снять напряжение, восстановить четкость зрения, покраснение век, слезотечение и даже избавиться от головной боли. Для тренировки микромышц глаз полезно играть в настольный теннис, бадминтон и большой теннис.

Таким образом, профессионально-прикладная физическая подготовка имеет важное значение для здоровья студентов. Здоровый специалист обладает высоким потенциалом социальной отдачи, профессиональной надежностью и эффективностью. В этом проявляется значимость профессионально-прикладной физической культуры в национальном масштабе.

УДК 81:37.016

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПИМСЛЕРА ПРИ ИЗУЧЕНИИ НЕМЕЦКОГО ЯЗЫКА

В. В. КУШНЕР

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Изучение немецкого языка в Белорусско-Российском университете для студентов технических специальностей осуществляется на первом курсе. Целью изучения является формирование иноязычной коммуникативной компетенции, т. е. готовности осуществлять общение на немецком языке, в том числе и с его носителями. Для того чтобы мотивировать студентов, необходимо расширить их коммуникативные возможности. Преподавателю следует искать такие приемы и методы, которые будут способствовать максимальной продуктивности учебной деятельности. Отличным вариантом для совершенствования языковых навыков является метод Пимслера. Этот метод позволяет овладеть свободными разговорными навыками языка. Лингвист Пол Пимслер несколько десятилетий назад провел ряд научных исследований. На базе данного метода и был разработан курс изучения немецкого языка, который подается с определенной научно обоснованной периодичностью. Курс распределен на уроки продолжительностью 30 мин, что позволяет сохранить максимальную концентрацию изучаемой лексики. За счет многократного повторения одних и тех же грамматических структур и шаблонов осваивается новая лексика. Все уроки распределены так, что не нужно наизусть заучивать урок, чтобы приступить к следующему. Все слова и выражения в курсе повторяются на протяжении следующих уроков. Затем в новых уроках из них составляются другие фразы, предложения и диалоги.

Курс представляет собой диалог с диктором, носителем языка. Диктор может зачитывать предложение в отрыве от контекста, а иногда в определенной ситуации. Аудиозапись так и «говорит» вам: «Представьте, что вы находитесь в ресторане в центре ...». Сохраняются паузы, необходимые для того, чтобы можно было вслух повторить только что услышанное либо по памяти сказанное предложение, которое ранее было озвучено. Студенты не просто слушают и повторяют, а создают новые предложения, используя уже известные слова и конструкции. Происходит процесс расширения словарного запаса по мере прохождения уроков. Основным преимуществом метода можно назвать то, что не надо заучивать правило в процессе изучения грамматических структур, слова повторяются с научно обоснованной периодичностью.

Данный метод основывается на том, чтобы на слух воспроизвести то, что было услышано, концентрируясь на этом, ведь возможности заглянуть в записи нет, метод этого шанса не дает. Преимущества данного метода позволят восполнить пробелы языковых знаний, а также значительно пополнить словарный запас, совершенствовать навыки говорения и аудирования.



УДК 796.011.2:378

## ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТУДЕНТОВ ЗА СВОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ПУТИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

О. П. МАКАРЕНКО, Д. Н. САМУЙЛОВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Общие вопросы формирования здорового, физически развитого, ответственного молодого человека имеют важную роль в высших учебных заведениях. Разнообразные подходы к решению проблемы здоровья, физической подготовки и физического совершенства, улучшения физического состояния молодежи применяют преподаватели, работающие по дисциплине «Физическая культура» Белорусско-Российского университета, одним из перспективных направлений которой является формирование ответственности молодого человека за свое физическое состояние.

При формировании ответственности студента за свое физическое состояние необходимо учитывать культурологический, личностный, индивидуальный подход к каждому обучающемуся.

Студенты 1–4 курсов по-разному проявляют ответственность за свое физическое состояние в процессе учебной деятельности.

Так, ответственность студентов первых курсов проявляется как чувство долга. На данном этапе студенты еще не могут правильно расставить приоритеты получения знаний и в полной мере понять ответственность за свое физическое состояние. Поэтому на занятиях по физической культуре применяются не только практические занятия, но и информационные беседы, тренинги, методики здоровьесберегающих технологий.

На втором курсе студенты уже в определенной степени понимают индивидуальную ответственность за свое физическое состояние, поскольку уже четко установили связь между собственными действиями и их последствиями. Это позволило им на занятиях по физической культуре выделить именно те виды деятельности, которые способствуют трудолюбию, любознательности, потребности в самоутверждении. Такая организация учебных занятий имеет цель сочетать занятия по физической культуре и спорту с современными технологиями познания себя как личности. Таким образом, оценка и самооценка студентов имеет тенденцию приближения к адекватности, что и обеспечивает выявление основных атрибутов их ответственности за свое физическое состояние.

Студенты старших курсов имеют адекватную самооценку, остро нуждаются в самоутверждении и профессиональном самоопределении и четко формируют ответственность за свое физическое состояние, которое имеет важное значение для становления их личности и дальнейшей профессиональной деятельности.

УДК 378.4

## ГУМАНИТАРНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

Е. А. МАЛЬШЕВА

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В техническом вузе гуманитарные науки формируют у студентов способность к расширению кругозора, дают возможность овладеть широким спектром знаний и познаний самого себя, а также понимать важность связи гуманитарных предметов и инженерных решений. Знания, полученные учащимися по гуманитарным дисциплинам, значительно повысят конкурентоспособность выпускника высшего учебного заведения на рынке труда.

Одним из основных предметов гуманитарной направленности считается философия. Она помогает анализировать сложные и абстрактные понятия, вырабатывает способность критически мыслить и обосновывать свои взгляды.

Изучение этики студентами развивает навыки принятия эстетических решений в профессиональной деятельности, понимания последствий своих действий и принятия конструктивных решений.

Социология является неотъемлемой частью профессиональной культуры инженера, при освоении которой развивается аналитическое мышление. Студент учится анализировать воздействие техники на социальные структуры и процессы, а также принимает информированные решения в технической сфере, учитывая социальные аспекты. В ходе обучения определяется социально приемлемая траектория его научных изысканий и технических проектов, способов их реализации и практического применения.

Психология оказывает положительное воздействие на будущую карьеру студентов, т. к. помогает развить навыки эффективного взаимодействия и понимания сокурсников, преподавателей и будущих коллег.

Иностранные языки формируют межкультурное общение в студенческой среде и дают возможность в будущем реализовать себя в международной среде.

Гуманитарная составляющая в образовательной программе технического вуза может способствовать формированию у студентов более полного и глубокого понимания их профессиональной деятельности. Студенты видят свою профессию не только как техническую деятельность, но и как интегральную часть общества и его развития. Кроме того, гуманитарные предметы обогащают личностное развитие студентов, помогают им лучше понимать самих себя и других людей, что может быть важно в работе, в команде и во взаимодействии с клиентами.

УДК 796.011.2:378

## АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗДОРОВОГО ОБРАЗА ЖИЗНИ СТУДЕНЧЕСКОЙ МОЛОДЕЖИ

В. Ф. ПИСАРЕНКО, О. П. МАКАРЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Формирование здорового образа жизни молодого поколения является важнейшей задачей Республики Беларусь. Сохранение, развитие здоровья, формирование здорового образа жизни имеет приоритетное значение во всех сферах образования.

Все учебные заведения в Республике Беларусь проявляют огромный интерес к вопросам здоровья учащихся, формируют ответственное отношение к собственному здоровью, здоровью окружающих и здоровью будущих поколений.

В Белорусско-Российском университете особое внимание уделяется формированию здорового образа жизни студентов. Преподаватели направляют свои знания, мастерство, опыт на решение вопросов улучшения здоровья студенческой молодежи, привлечения обучающихся к физической культуре и спорту, к физкультурно-оздоровительным и спортивно-массовым мероприятиям.

Большинство студентов невнимательно относятся к своему здоровью. Нерегулярное питание, отсутствие физических нагрузок, недосыпание, мало-подвижный образ жизни, недостаточное пребывание на свежем воздухе, вредные привычки – все эти негативные последствия накапливаются в течение всего обучения в высшем учебном заведении и имеют существенное влияние на состояние здоровья обучающихся. Сохранение и укрепление здоровья студентов является одной из важных проблем всех учебных учреждений и нашего общества.

Глобальная весомость и актуальность проблемы вызывает необходимость основательных исследований феномена здоровья человека и его составляющих. Здоровье – это первая и важнейшая потребность человека, определяющая способность его к труду и обеспечивающая гармоничное развитие личности.

В настоящее время принято выделять несколько видов здоровья: физическое, психическое, эмоциональное, социальное, духовное [1].

Физическое здоровье – это естественное состояние организма, обусловленное нормальным функционированием всех его органов и систем. Процесс развития физического здоровья предполагает: гармоничное взаимодействие физиологических процессов; совершенствование саморегуляции в организме; максимальную адаптацию к окружающей среде. Если хорошо работают все органы и системы, то и весь организм человека правильно функционирует и развивается.

Психическое здоровье – состояние психической сферы, основу которой составляют адекватная личность и статус общего психического комфорта. Психическое здоровье содержит высокий уровень сознания, большие внутренние и моральные силы, развитие мышления, что побуждает личность к творческой деятельности.

Эмоциональное здоровье – это наличие лишь положительных эмоций или равновесие положительных и отрицательных эмоций, психологическое эмоциональное равновесие.

Социальное здоровье – оптимальные, адекватные условия социальной среды, препятствующие возникновению социально обусловленных заболеваний, социальной дезадаптации и определяющие состояние социального иммунитета, гармоничное развитие личности в социальной структуре общества.

Духовное здоровье – комплекс потребностей, мотивационной и информативной сфер жизнедеятельности, основу которого определяет система ценностей, наставлений и мотивов поведения человека в обществе. Духовное здоровье зависит от духовного мира личности, составляющих духовной культуры человечества, образования, науки, морали, этики, искусства, религии.

Здоровье является сложным динамическим процессом, который тесно связан с образом жизни человека. Взаимосвязь между образом жизни и здоровьем наиболее полно отражает понятие «здоровый образ жизни».

Здоровый образ жизни – это поведение человека, которое отражает жизненную позицию, направленную на сохранение и укрепление здоровья, и нацелено на выполнение определенных норм и правил. Составляющие здорового образа жизни – комплекс компонентов, обеспечивающих высокий уровень физического, психического, духовного и социального здоровья человека, к которым в первую очередь относят занятия физической культурой, двигательную активность, питание, бытовые условия, условия труда.

Поэтому очень важно, когда преподаватели умеют привлечь каждого студента к здоровому образу жизни на занятиях физической культурой и спортом [2].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тапорчикова, М. В.** Актуальные проблемы физического воспитания студентов вуза и поиск их решения / М. В. Тапорчикова // Физическая культура, спорт, здоровый образ жизни в XXI веке: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 16–17 дек. 2021 г. – Могилев: МГУ имени А. А. Кулешова, 2022. – С. 70–73.

2. **Копылова, Е. А.** Исследование мотивации к занятиям физической культурой у студентов вуза технического профиля / Е. А. Копылова, Т. В. Афанасенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 480–481.

УДК 330

КУРС «ОСНОВЫ РОССИЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОСТИ»:  
ИДЕОЛОГИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ И ПРОБЛЕМЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Д. М. ПОПЕЛЬШКО

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

С сентября 2023 г. в составе блока гуманитарных дисциплин появился новый предмет под названием «Основы российской государственности». Введение данной дисциплины в образовательную систему вузов, очевидно, носило в первую очередь политический характер и было вызвано кризисными явлениями в жизни российского общества, проявившимися после событий 2022 г. в украинско-российском конфликте. Осенью 2022 г. стала очевидной проблема дефицита идеологической составляющей в системе высшего образования в частности и в духовной жизни российского общества в целом.

Республика Беларусь с подобной ситуацией сталкивается не в первый раз. Уже в начале нового века была осознана необходимость включения идеологической составляющей и воспитательной функции в процесс подготовки специалистов с высшим образованием, что привело к формированию соответствующего курса идеологии белорусского государства. Новые факторы в системе внутри- и межгосударственных процессов привели к введению курса «История белорусской государственности», в значительной мере, если не сказать больше, имеющего ярко выраженную идеологическую составляющую.

В России долгий период времени был принят курс на деидеологизацию, и не только высшего образования. Фактически отказ от собственной государственной идеологии означал принятие западного идеологического комплекса, что не могло не привести к противоречиям с исторически сложившейся системой ценностей и мировоззренческих ориентиров российского общества, что проявилось и в системе высшего образования. Как в свое время отметили Л. Беляева и О. Сигнаевская, «сакральное ядро русской культуры остается, как это ни парадоксально, маргинальным для идеологических ориентиров отечественных гуманитарных технологий» [1, с. 28]. Ими же верно было констатировано, что «университетское образование априори предполагает глубокую и широкую социально-гуманитарную подготовку (культуру), в первую очередь, в рамках своего российского культурного наследия» [1, с. 26].

Доктор исторических наук, декан факультета политологии МГУ им. Ломоносова А. Шутов, представляя новую дисциплину, прямо указал на то, «что в социально-гуманитарные науки возвращается ценностная база, основанная на наших национальных интересах». Таким образом, введение вышеназванного курса вызвано в первую очередь государственными проблемами и задачами, т. е. курс должен быть сосредоточен именно на идеологическом аспекте. Этому соответствует и одна из заявленных задач курса: «представить историю России

в её непрерывном цивилизационном измерении, отразить её наиболее значимые особенности, принципы и актуальные ориентиры», «сформировать систему координат, в которой будет жить и развиваться российская молодёжь».

Однако в процессе выполнения поставленной задачи возникает целый ряд моментов, на которые нельзя не обратить внимание.

Сначала хотелось бы выделить проблему «красной нити», ключевой идеи преподавания. Как видится автору, такой идеей может выступить концепция «Россия – «государство-цивилизация» как естественно возникшее, исторически закономерное явление. Именно такой подход помогает раскрыть особенности и специфику современного российского общества. Но одновременно не может не возникнуть вопрос: сохраняется ли целостность, историческая преемственность именно государства на разных этапах развития, идеи государства на данной территории? Те переломные моменты, которыми так богата российская история (монголо-татарское нашествие, Смута, революция 1917 г., крах СССР), не привели ли к исчезновению одних моделей государства и возникновению совершенно иных его форм? Причем еще раз подчеркнем, что речь должна идти именно о государстве, а не о государственности как таковой. Без решения этого вопроса трудно говорить о формировании целого ряда мировоззренческих и ценностных ориентиров в рамках идеологической составляющей курса. Далее необходимо обратить внимание на сам подход формирования идеологии «сверху», со стороны государственной власти. Здесь возникает опасность повторить негативный опыт прошлого, и не только СССР, но и Российской Империи, когда собственно государственная идеология, будь то статус и роль партии или сакральность самодержца российского, становились своего рода «симулякрами реальности – событиями ради событий, мероприятиями ради мероприятий», и переставали эффективно выполнять те же идеологические функции. Наконец, следует задать вопрос о комплексе базовых ценностей, прописанных в известном Указе Президента Российской Федерации от 2022 г. В условиях поликультурности почти любые ценности могут выполнять как консолидирующую общество функцию, так и совершенно противоположенную. Следует уделить внимание именно их консолидирующему потенциалу с учетом специфики регионов.

Все вышеназванные вопросы так или иначе требуют своего разрешения для успешной реализации стоящих перед курсом задач.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляева, Л. А.** Идеологические основы гуманитарных технологий в образовательном пространстве вуза / Л. А. Беляева, О. Р. Сигнаевская // *Философия и наука : материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, Екатеринбург, 22 апр. 2014 г.* – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2014. – С. 26–32.

УДК 372.881.111.1

## ОБУЧЕНИЕ ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ ПОД РУКОВОДСТВОМ ИНФЛЮЕНСЕРОВ

Н. М. САВЧЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

В соответствии с учебными планами специальностей, по которым осуществляется подготовка в Белорусско-Российском университете, на дисциплину «Иностранный язык» предусмотрено 100 ч аудиторной работы и 116 ч самостоятельной. В большинстве случаев в группе оказывается 2–5 студентов, имеющих хороший уровень владения иностранным языком, в то время как остальные не имеют ни желаний, ни мотивации его повысить. Задача преподавателя – максимально заинтересовать таких студентов в изучении иностранного языка и при этом не упустить и уделить достаточно внимания студентам, желающим расширить круг своих знаний. В связи с этим возрастает роль самостоятельной работы и ее качества. Учитывая, что современная молодежь проводит слишком много времени в социальных сетях, представляется возможным использовать их ресурсы в помощь преподавателю.

Высокоскоростная и доступная сеть Интернет в сочетании с простыми и бесплатными авторскими платформами привели к росту числа «инфлюенсеров» в социальных сетях. Эти онлайн-личности создали большую базу поклонников: тысячи и даже миллионы зрителей регулярно следят за ними в интернете. Они представляют информацию и делятся своими взглядами на продукты, услуги и социальные тенденции. До недавнего времени инфлюенсеры были в основном связаны с маркетингом, но некоторые из них зарекомендовали себя в сфере образования. Инфлюенсеры все чаще формируют решения учащихся о том, чему учиться, у кого и где, при этом стираются границы между развлечением и обучением. Контент, который создают инфлюенсеры, вместе с их подходами к обучению может иметь широкий охват и потенциально глубокое влияние. Все чаще наблюдаем, как к инфлюенсерам относятся как к учителям, а учителя превращаются в инфлюенсеров. Это привело к дискуссиям среди преподавателей о том, можно ли использовать популярность инфлюенсеров и их методы для улучшения качества онлайн-образования [1, с. 35].

Инфлюенсеры в сфере образования бесплатно предоставляют своим зрителям видео и другой контент, выходящий за рамки аккредитованных образовательных программ. Они привлекают большие группы подписчиков благодаря своему стилю презентации, ориентированному на аудиторию. Их видеоролики часто содержат мультимедийные материалы (анимацию, графику, изображения и музыку) для улучшения презентации. Многим удается привлечь многомиллионную аудиторию. Общедоступные и бесплатные платформы созданы для того, чтобы подписчики могли легко взаимодействовать с преподавателем (инфлюенсером) и другими подписчиками, поощряя чувство общности, например, посредством «лайков», комментариев или бесед.

Примером качественного контента является канал English with Lucy на YouTube, созданный носителем английского языка, квалифицированным преподавателем Люси Симкинс и имеющий 10,5 млн подписчиков. За инновации в преподавании английского языка в 2017 г. она была награждена премией ELTon, присуждаемой Британским Советом. Канал неоднократно анализировался методистами и был рекомендован изучающим английский язык. Канал доступен также и на других платформах – Facebook, TikTok и Instagram. Контент полезен для студентов любого уровня владения языком.

Многие университеты во всем мире в настоящее время используют платформы социальных сетей для продвижения своей деятельности, некоторые активно распространяют учебный контент через эти каналы и анализируют методы социального влияния с целью расширения аудитории. Однако нужно учесть и ряд проблем, связанных с преподаванием в социальных сетях. Так, например, по требованию спонсоров инфлюенсеры могут случайно или даже намеренно вводить в заблуждение или дезинформировать своих подписчиков. У самих платформ имеются собственные мотивы для продвижения продукции, они не всегда стремятся удовлетворять интересы или образовательные приоритеты аудитории, которую часто побуждают просматривать то, что выгодно для платформы, а не то, что полезно самим подписчикам [1, с. 37].

Рост нетрадиционных форм обучения, таких как образование под руководством инфлюенсеров, в сочетании с их привлекательностью и охватом широкой аудитории через цифровые и онлайн-платформы, делают такое преподавание своевременным и важным. Критики подобного образования считают, что им движет коммерциализированный образ жизни, а осуществляют его неквалифицированные люди, чьи мотивы, в лучшем случае, сомнительны [1, с. 38]. Тем не менее инфлюенсеры в сфере образования охватывают миллионы, готовых учиться таким способом, и ими накоплен огромный опыт в том, как привлечь и поддерживать аудиторию в новых онлайн-пространствах. Педагогический потенциал, связанный с инфлюенсерами, может принести в современный образовательный процесс множество идей, ведь в настоящее время на первый план выдвигаются новые учебные пространства, гибкость, повсеместность и взаимосвязанность в обучении.

Таким образом, широкомасштабное обучение под руководством инфлюенсеров, по всей видимости, будет играть все более и более возрастающую роль в образовании в будущем. Его положительные стороны можно применять в образовательном процессе как в виде фрагментов аудиторных занятий, так и в самостоятельной работе, а качественный контент уверенно рекомендовать студентам для просмотра и повышения уровня владения иностранным языком.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influencer-led education // *Innovating Pedagogy 2022: Open University Innovation Report 10*. – Milton Keynes: The Open University. – 2022. – P. 35–39.



УДК 796.011.2:378.4

## ФИЗИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТЬ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ГРУППЫ

Л. А. САДОВСКАЯ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Студенческая молодежь – стратегическое будущее нашей страны. Следовательно, проблемы физической подготовленности молодого поколения, так же как и состояние их здоровья, становятся первостепенными.

В высших учебных заведениях большое внимание уделяется физической подготовленности студентов основной медицинской группы – практически здоровых по медицинским показаниям – и подготовительной, имеющих небольшие отклонения в состоянии здоровья.

К студентам специальной медицинской группы оно менее пристальное. Количество же таких студентов ежегодно увеличивается и сейчас составляет в некоторых учебных заведениях от 30 % до 40 % всех обучающихся [1, 2].

Однако, являясь будущими специалистами в той или иной отрасли народного хозяйства, они должны иметь физическую подготовленность в соответствии с требованиями профессиональной и общественной деятельности.

В связи с этим физическая культура в высших учебных заведениях для студентов специальной медицинской группы направлена на повышение функциональных возможностей всех систем организма; совершенствование координации двигательных и вегетативных функций; повышение уровня сопротивляемости организма неблагоприятным факторам; обеспечение необходимого объема двигательной активности, отвечающего требованиям оздоровительной направленности; овладение спортивно-прикладными умениями и навыками для полноценного жизнеобеспечения, физического труда.

Цель работы – оценить физическую подготовленность части студентов специальной медицинской группы Белорусско-Российского университета; проследить тенденцию улучшения или ухудшения показателей к результатам студентов прошлых лет для дальнейшего корректирования занятий по физической культуре для данного контингента обучающихся.

Для оценки уровня подготовленности были взяты результаты контрольных упражнений осеннего семестра 2023 г. студентов II курса (юноши) со следующими заболеваниями: сколиоз различной степени тяжести; миопия средней степени; сердечно-сосудистые заболевания. Для сравнения – результаты студентов II курса за 2015 г. и 2019 г. с такими же заболеваниями.

Анализировались основные упражнения: сгибание-разгибание рук в упоре лежа; подтягивание на низкой перекладине; поднимание-опускание туловища из положения лежа; приседание, бег-ходьба за 6 мин.

Средние показатели выполнения контрольных упражнений, приведенные в табл. 1, позволяют оценить подготовленность нынешних студентов и их ровесников в 2015 г. и 2019 г.

Табл. 1. Средние показатели выполнения контрольных упражнений. Динамика физической подготовленности

Год обучения. Средний показатель. Динамика	Норматив (юноша)									
	Сгибание-разгибание рук		Подтягивание		Поднимание-опускание туловища		Приседание		6-минутный бег-ходьба	
	Количество раз	% от макс.	Количество раз	% от макс.	Количество раз	% от макс.	Количество раз	% от макс.	Количество метров	% от макс.
Максимальный результат	35		26		50		50		1400	
2015 г. Средний показатель	27	77	23	88	50	100	50	100	1315	94
2019 г. Средний показатель	25	71	19	73	43	86	49	98	1100	79
2023 г. Средний показатель	22	63	20	77	41	82	47	97	990	71
Динамика к 2019 г.	-3	-8	+1	+4	-2	-4	-2	-1	-110	-8
Динамика к 2015 г.	-5	-14	-3	-11	-9	-18	-3	-3	-325	-23

### Выводы.

1. Данные таблицы позволяют констатировать снижение физической подготовленности студентов специальной медицинской группы на протяжении ряда лет.

Значительно ухудшилась общая выносливость – результаты 6-минутного бега-ходьбы стали меньше на 23 % по отношению к 2015 г.

Показатели всех силовых упражнений также снизились к 2015 г.

2. Слабая физическая подготовленность данной категории студентов, возможно, является следствием существенного отставания теории и методики физического воспитания от требований вузовской практики и реалий современной жизни.

3. Необходимо скорректировать аэробную и силовую нагрузку. Больше индивидуализировать подбор упражнений и их дозировку в зависимости от физических возможностей студентов.

Это позволит системно и целенаправленно реализовать потенциал занятий физической культурой для студентов специальной медицинской группы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовская, Л. А. Сравнительный анализ заболеваемости студентов на начальном этапе обучения в БРУ / Л. А. Садовская / Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 484–485.

2. Эффективность занятий физической культурой студентов с учетом уровня подготовленности / А. В. Щур [и др.] // Неделя науки СПбПУ. Высшая школа техносферной безопасности: материалы науч. конф. с междунар. участием. – Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2017. – С. 8–10.

УДК 374.7

## ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ВЗРОСЛЫХ КАК ПРИОРИТЕТ СОЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГОСУДАРСТВА

С. Б. САМАРЦЕВ, С. О. КАМИНСКАЯ, К. С. САМАРЦЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Одной из ключевых областей Марракешских рамок действий [1] является «культура обучения на протяжении всей жизни» как «общественное усилие, которое служит не только сфере труда, но и индивидуальному благополучию и общему благу».

Дополнительное образование взрослых (ДОВ) совместно со средним, профессиональным и высшим образованием представляется важным направлением концепции обучения на протяжении всей жизни, которое вносит значительный вклад в глобальную конкурентоспособность национальной системы образования Республики Беларусь.

Кодекс об образовании Республики Беларусь ориентирует общество на целостное, интегрированное, системное и всеохватывающее понимание обучения взрослых, на основе исторической общности и национальных традиций формирует современную образовательную политику и структурное обеспечение ДОВ. Долгосрочные экономические и социальные цели государства, субъекты рынка и гражданского общества укрепляют культуру обучения взрослых на протяжении всей жизни, совершенствуют национальную модель ДОВ для повышения качества и эффективности педагогических методик.

Потребность социальной справедливости, социальной безопасности, сплоченности, гражданского участия и необходимость экономического роста диктуют масштабный процесс межкультурного обучения коренных белорусов, новоприбывшего населения. Соответственно, возможности обучения на протяжении всей жизни должны быть доступны для всех категорий взрослых. Особое внимание следует уделять менее обеспеченным слоям населения, а также в силу тенденций старения населения – определенным возрастным группам. ДОВ должно стать доступным на всех уровнях и локациях обучения. Необходимо активное и устойчивое региональное участие в выявлении и удовлетворении спроса. Отметим, что демографические проблемы в Европе усиливают мотивацию нанимателей обучения взрослых в большей степени, чем переподготовку или повышение квалификации работника, ориентированных на получение ключевых компетенций [2].

Для управления новыми вызовами и профессиями нужен высококвалифицированный персонал в области образования взрослых. Его профессиональное развитие, поддержка и мобильность требуют серьезного внимания для оценки обеспеченности и усиления кадрового развития. Высокое качество

поддержки обучения взрослых прежде всего зависит от достигнутого экономического уровня развития государства, выполняемых национальных проектов и проводимых в этой связи реформ: экономических, административных, социальных.

В региональных условиях сказываются развитие в уровне подготовки преподавателей и обучающихся, ограниченность материально-технической базы структурных подразделений ДОВ, отсутствие финансовых возможностей на местах, низкая корпоративная и социальная ответственность руководителей организаций, ведомств и пр.

В то же время в ДОВ появилась возможность реализовать преимущества цифровизации [3]. Так, новые информационные технологии, доступ к глобальной сети и современные средства коммуникаций позволяют применить актуальные достижения глобализации в образовании и обучении взрослых, во многом компенсируя негативные последствия вышеупомянутых недостатков.

Вместе с тем наряду с формальным образованием растет признание неформального и информального образования и обучения взрослых, что отвечает не только интересам рынка труда и не только означает трансформацию авторитета официальных институтов и качества образования и обучения, но и отвечает интересам всех действующих лиц, в особенности взрослого большинства обучающегося общества. Вероятно, признание институционализации неформального обучения явилось бы ключевым инструментом повышения мотивации, доступа, участия и результатов обучения.

Эффективность и справедливость ДОВ могут быть реализованы только в том случае, если не будет ограничиваться вклад обучения взрослых в успех национальных экономических и социальных проектов.

Это потребует не только доступного подхода ко всем формам обучения взрослых, но и создания систем измерения и мониторинга, позволяющих планировать развитие обучения взрослых, принимать прозрачные решения и оценивать качество эксклюзивным образом.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. CONFINTEA VII, проект Марракешских рамок действий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.uil.unesco.org/sites/default/files/medias/fichiers/2022/06/RU\\_Draft%20FrameWork%20for%20Action\\_Deckblatt.pdf](https://www.uil.unesco.org/sites/default/files/medias/fichiers/2022/06/RU_Draft%20FrameWork%20for%20Action_Deckblatt.pdf). – Дата доступа: 12.05.2023.
2. Самарцев, С. Б. Тенденции развития образования взрослых / С. Б. Самарцев, С. О. Каминская, К. С. Самарцев // Обеспечение качества образования: состояние, проблемы и перспективы: материалы I Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 2 февр. 2023 г. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – С. 93–98.
3. Университеты в современной парадигме промышленности / С. О. Каминская [и др.] // Система непрерывного образования в общеевропейском образовательном контексте: перспективы, развитие, профессионализм: сб. науч. ст. Междунар. образоват. семинара, Могилев, 11–18 февр. 2017 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 24–32.

УДК 372.881.111.1

## ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ ВТОРОМУ ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ЗАРУБЕЖНОЕ РЕГИОНОВЕДЕНИЕ»

В. Н. СТАВСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Направление подготовки «Зарубежное регионоведение» включает в себя изучение иностранных языков, всемирной истории, международных отношений, политической географии, межкультурных коммуникаций и т. д. Будущий специалист должен отлично знать язык, культуру, экономику стран изучаемого региона. В процессе подготовки будущего специалиста большое внимание уделяется изучению иностранных языков. В Белорусско-Российском университете уже с первого года обучения студенты изучают английский и немецкий языки. Изучение второго иностранного языка происходит на основе знаний родного языка, а также знаний английского языка.

В процессе обучения немецкому языку на первом курсе студенты направления подготовки «Зарубежное регионоведение» обучаются фонетике немецкого языка, правилам произношения и интонации, усваивают разницу между немецким и английским произношением и чтением слов. Последовательно идет процесс усвоения грамматики и лексики.

Изучение лексики происходит с опорой на уже знакомые слова английского языка. В процессе преподавания немецкого необходимо приводить примеры схожести немецких слов со словами из родного и английского языков. Это ускоряет процесс освоения лексики. В качестве примера можно привести следующие слова: Arm-arm, Hand-hand, Bär-baer, Bier-beer, Schwester-sister, Haus-house. Более трудным является процесс усвоения сложных немецких слов: die Kuchenwaage, die Qualitätskontrolle, die Sehenswürdigkeit и др.

На современном этапе обучения основным в процессе обучения является коммуникативный метод. Активное использование этого метода позволяет студентам легче и быстрее усвоить немецкий язык. Современные учебники и пособия с опорой на информационно-коммуникативные технологии позволяют широко применять коммуникативный метод в процессе обучения студентов немецкому языку в качестве второго иностранного языка.

Наличие большого количества аудио- и видеоматериала позволяет усвоить хорошо немецкое произношение, развить навыки аудирования. Процесс изучения второго иностранного языка приводит к получению и углублению страноведческих и лингвострановедческих знаний, что позволяет студентам в будущем стать профессионалами своего дела.

УДК 796.011.3:159.923.5

## ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛИЧНОСТИ СТУДЕНЧЕСКОЙ МОЛОДЕЖИ

М. В. ТАПОРЧИКОВА, М. В. ВАСЮХНЕВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Согласно многим исследованиям, физическая активность может значительно улучшить качество жизни. Регулярные занятия спортом или другими видами физической активности способствуют повышению физического состояния, укреплению иммунитета, улучшению работы сердечно-сосудистой системы, снижению уровня стресса и улучшению настроения.

Жизнь в тандеме с физической культурой и спортом объединяет все сферы жизнедеятельности личности, коллектива, социальной группы. В первую очередь спорт укрепляет здоровье, повышая общую физическую подготовленность, что влияет на эффективность труда, учебу и повседневную рутину. Кроме того, занятия физической культурой помогают развивать дисциплину и формируют устойчивость к стрессам и негативным воздействиям окружающей среды.

Постепенное включение в жизнь студента регулярных занятий физическими упражнениями, сбалансированного питания, отказа от вредных привычек формирует у него позитивное отношение к жизни, помогая адаптироваться к окружающим изменениям [1].

Также физическая культура и спорт помогают поддерживать оптимальный вес, улучшить сон, повысить уровень энергии выносливости, улучшить концентрацию и память. Более того, занятия спортом могут дать студенту новые цели и увлечения, помочь в построении социальных связей и развитии личности.

Таким образом, жизнь в тандеме с физической активностью помогает раскрыть потенциал человека и улучшить его общее эмоциональное и физическое благополучие.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васюхневич, М. В.** Физическая культура как средство формирования целостного развития личности студента / М. В. Васюхневич // Современное педагогическое знание: проблемы и перспективы развития: сб. науч. ст. по итогам пед. чтений, посвящ. 100-летию кафедры педагогики, Могилев, 17 дек. 2013 г. – Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова, 2014. – 204 с.

УДК 378.4

## ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА С ПЕРСПЕКТИВАМИ НА БУДУЩЕЕ

М. В. ТАПОРЧИКОВА, Н. А. ПЕРЕЦ  
Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Высшее техническое образование в Республике Беларусь является престижным и доступным. На сегодняшний день выпускникам среднего, а также среднего специального образования предоставляется возможность выбрать любую форму обучения: дневную, вечернюю, заочную и дистанционную. Однако выбор абитуриента в пользу того или иного высшего учебного заведения зависит от множества факторов: техническая оснащенность вуза; адаптация к быстроменяющимся рыночным потребностям; высококвалифицированный преподавательский состав; обеспечение условий обучения; современные подходы обучения; финансирование и т. д.

Рассмотрим и проанализируем несколько из них.

1. Учебные программы и техническое оборудование. С современными технологиями меняется и образование, поэтому важно постоянное обновление содержания учебных программ и предоставление студентам доступа к современному оборудованию. В современном мире технологии быстро развиваются, что приводит к изменениям в требованиях к профессионалам в технических специальностях. На этом фоне старые программы обучения и устаревшее оборудование могут не соответствовать современным стандартам профессиональной подготовки и требованиям рынка труда.

Обновление учебных программ подразумевает адаптацию предметов к последним технологическим достижениям, индустриальным стандартам и потребностям рынка труда. Это также может включать в себя добавление новых предметов, связанных с актуальными технологиями или инновациями в отрасли.

Предоставление студентам доступа к современному оборудованию является ключевым аспектом. Студенты должны иметь возможность работать со всеми современными инструментами и технологиями, которые они будут использовать в своей профессиональной деятельности после окончания вуза. Немаловажно иметь доступ к лабораториям с передовым оборудованием и программным обеспечением, которые используются в промышленности [1].

Как результат, обновление учебных программ и оборудования помогает подготовить студентов к работе в современной индустрии, повышает качество образования и конкурентоспособность выпускников на рынке труда.

2. Адаптация к быстроменяющимся рыночным потребностям. Технические специальности нужно адаптировать к современным требованиям рынка труда, чтобы выпускники вуза были востребованы.

Необходимо постоянно оценивать текущие и предполагаемые потребности рынка труда в специалистах технического профиля. Это включает в себя

изучение требований квалификаций, необходимых навыков и компетенций, которые ценятся в сфере промышленности, информационных технологий, инженерии и других отраслях.

Развитие практических навыков, помимо теоретической подготовки, – немаловажная часть обучения будущих специалистов. Для приобретения опыта должны быть созданы лаборатории, практикумы и специальные курсы, цель которых – подготовить студентов к реальной работе в профессиональной сфере.

3. Установление партнерских связей с предприятиями. Сотрудничество вуза с компаниями и предприятиями позволяет учебному заведению следить за потребностями рынка труда и обеспечивать студентам возможности для стажировок и реальной практики, что способствует улучшению подготовки и адаптации к современным запросам.

4. Привлечение квалифицированных преподавателей. Важно привлекать специалистов с практическим опытом и обновлять кадры для обучения студентов. Практикующие преподаватели, которые имеют практический опыт в соответствующих отраслях, могут предоставить студентам актуальные и реальные примеры из практики, что обогатит их образование и поможет лучше подготовиться к будущей профессиональной деятельности.

5. Современные подходы к обучению. Чтобы поддерживать высокий уровень преподавательского состава, необходимо обновлять профессиональные знания преподавателей, давать возможность им учиться новым методикам, осваивать современные образовательные технологии.

Привлечение и удержание квалифицированных преподавателей в техническом вузе не только обеспечивает высокое качество обучения студентов, но также способствует обновлению учебных планов и методик, поддерживает вуз в актуальном состоянии и укрепляет его позиции на рынке образовательных услуг.

6. Финансирование. Технические вузы нуждаются в значительных инвестициях в современные технологии и оборудование, а также в развитие инфраструктуры и исследовательской деятельности.

Для обучения студентов в сфере технических специальностей необходимо постоянное обновление и расширение оборудования, включая современные компьютеры, лабораторное оборудование, технические инструменты и другие технологические средства. Поэтому финансовое обеспечение вуза – одно из приоритетных условий в выборе высшего учебного заведения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каплунов, И. А.** Популярность инженерных профессий: результаты социологических опросов / И. А. Каплунов, Е. В. Ключникова // Инженерное образование. – 2017. – Вып. 22. – С. 26–34.



УДК 355.233.231.1:821.161.3

ВЫКАРЫСТАННЕ ЛІТАРАТУРНАГА МАТЭРЫЯЛУ ПРЫ ВЫВУЧЭННІ  
ДЫСЦЫПЛІНЫ «БЕЛАРУСКАЯ МОВА (ПРАФЕСІЙНАЯ ЛЕКСІКА)»

А. В. ШАРАПАВА

Беларуска-Расійскі ўніверсітэт  
Магілёў, Беларусь

28 снежня 2023 г. была зацверджана Канцэпцыя развіцця нацыянальнай культурнай прасторы ва ўсіх сферах жыцця грамадства на 2024–2026 гады (далей – Канцэпцыя). Яе актуальнасць «абумоўлена неабходнасцю захавання адзінства беларускага народа і забеспячэння далейшай кансалідацыі беларускага грамадства, а таксама ўмацавання незалежнай беларускай дзяржавы і фарміравання нацыянальнага чалавечага капіталу» (тут і далей пераклад на беларускую мову аўтара – А. Ш.) [1]. Рэалізацыя задач Канцэпцыі павінна адбывацца ва ўсіх сферах жыцця беларусаў, асабліва ва ўстановах адукацыі. «У дзіцячых садках, школах, сярэдніх спецыяльных і вышэйшых навучальных установах фарміруецца духоўнае і маральнае аблічча нацыі. Каласальная адказнасць ляжыць на плячах выхавальнікаў, школьных настаўнікаў, выкладчыкаў ВНУ – захаванне пераемнасці нашых традыцыйных каштоўнасцяў. Галоўная ў іх – любоў да сваёй краіны» [2].

У шэрагу іншых вучэбных дысцыплін вышэйшай школы найбольшы выхаваўчы патэнцыял у дысцыплін сацыяльна-гуманітарнага блока. Устойліва і нязменна ўваходзіць у вучэбныя планы ўсіх спецыяльнасцяў нефілалагічнага профілю дысцыпліна «Беларуская мова (прафесійная лексіка)». Нездарма ў Канцэпцыі адзначана: «Беларуская мова прызнаецца адным з фактараў фарміравання нацыянальнага менталітэту» [1]. На занятках па беларускай мове ў межах праграмага матэрыялу заўсёды ёсць магчымасць узгадаць персаналіі выбітных пісьменнікаў, узяць прыклады з іх тэкстаў для практыкаванняў, актуалізаваць краязнаўчыя факты. У практыцы выкладання дысцыпліны для аналізу абіраецца творчасць пісьменнікаў-юбіляраў, пісьменнікаў-землякоў, што адпавядае мэтам практыкаарыентаванага навучання, дае магчымасць вырашыць пастаўленыя Канцэпцыяй задачы, яднае тэорыю і рэальнае жыццё.

У межах тэмы «Лексічная сістэма беларускай мовы» ў 2024 г. мэтазгодна выкарыстаць матэрыял, звязаны з жыццём і творчасцю Міхася Лынькова. Гэта абумоўлена наступнымі прычынамі: у гэтым годзе святкуецца 125-годдзе з дня нараджэння пісьменніка; многімі фактамі біяграфіі ён быў звязаны з Магілёўшчынай; яго творы – крыніца спецыяльнай лексікі. Інфармацыя мусіць быць пададзена блокам і ў адпаведнасці з планам заняткаў.

Так, у межах уступнай часткі можна: адзначыць, што скарбонкай лексікі беларускай мовы з’яўляецца творчасць пісьменнікаў, у тым ліку народнага пісьменніка БССР М. Лынькова; нагадаць, што дзяцінства і юнацтва пісьменніка прайшлі на чыгунцы, а ў 1905–1906 гг. Лыньковы жылі ў казарме паміж станцыямі Магілёў і Лотва. 3 мая 1925 г. яго накіравалі на працу сакратаром рэдакцыі акруговай газеты «Камуніст» (Бабруйск), у якой Лынькоў нарэшце стаў адказ-

ным рэдактарам. Цікава, што свой першы верш у пачатку 1921 г. ён надрукаваў якраз у гэтай газеце. У Бабруйску пісьменнік працаваў да 1930 г. За гэты час ён быў абраны членам прэзідыума, а з кастрычніка 1925 г. і кіраўніком Бабруйскай філіі «Маладняка», стаў членам Камуністычнай партыі, у 1926 г. ажаніўся з настаўніцай Х. А. Аранковай; запытаць, якія творы пісьменніка навучэнцам ужо вядомыя (у V класе для вывучэння рэкамендаваны аповяданне «Васількі», аповесць-казка «Пра смелага ваяку Мішку і яго слаўных таварышаў», для дадатковага чытання – аповесць «Міколка-паравоз»).

У межах тэмы «Тэрміналогія як вядучы складнік прафесійнага маўлення» і тлумачэнні новага матэрыялу мэтазгодна ў якасці ўзораў лексікі абмежаванага ўжытку прывесці прыклады з твораў пісьменніка: жарганізмы («Баян»), дыялектызмы («На чырвоных лядах»), спецыяльная лексіка: тэрміны і прафесіяналізмы («Андрэй Лятун», «Чыгунныя песні»). Апошняя група слоў можа стаць матэрыялам для вывучэння наступных праграмных пытанняў: спосабы і сродкі ўтварэння тэрмінаў розных галін дзейнасці; словаўтваральныя паказчыкі тэрмінаў; адаптацыя запазычаных тэрмінаў у беларускай мове.

На этапе рэфлексіі навучэнцам можна прапанаваць разгадаць крыжаванку, створаную на аснове тэрмінаў з лынёўкі твораў: стрэлка (прыстасаванне на рэйкавых пуцях для пераводу рухомага саставу з аднаго пуці на другі); счэпшчык (рабочы, які счэплівае вагоны); буфер (спецыяльнае прыстасаванне ў паравозах, вагонах, аўтамабілях для паслаблення сілы ўдару, штуршка пры сутыкненні); шпала (масіўны папярочны драўляны або жалезабетонны брус, на яго ўкладваюць рэйкі); мазут (астаткі ад нафты пасля адгонкі з яе бензіну, газу і газаліну); рэйка (на чыгуначным пуці: вузкі стальные брус, па якім коцяцца колы цягніка); рэгулятар (прыбор для рэгулявання чаго-небудзь); семафор (сігнальнае прыстасаванне на чыгунцы, якое паведамляе, што пуць свабодны або заняты); кукушка (размоўная назва невялікага манеўровага лакаматыва (прафесіяналізм)); паравоз (лакаматыв з паравым рухавіком) і інш.

Падобныя формы працы спрыяюць дасягненню шэрагу адукацыйных задач, з'яўляюцца прадуктыўнымі ў працэсе фарміравання грамадзянскасці, патрыятызму і нацыянальнай самасвядомасці на аснове дзяржаўнай ідэалогіі.

## СПІС ВЫКАРЫСТАНАЙ ЛІТАРАТУРЫ

1. Концепция развития национального культурного пространства во всех сферах жизни общества на 2024–2026 годы [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300961>. – Дата доступа: 01.02.2024.

2. Послание Президента Республики Беларусь А. Г. Лукашенко белорусскому народу и Национальному собранию Республики Беларусь 31 апреля 2023 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/events/poslanie-aleksandra-lukashenko-belorusskomu-narodu-i-nacionalnomu-sobraniyu-sostoitsya-31-marta>. – Дата доступа: 22.01.2024.

Научное издание

# **МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Материалы Международной  
научно-технической конференции  
(Могилев, 25–26 апреля 2024 года)

**Авторы несут персональную ответственность  
за содержание тезисов докладов**

Корректоры *И. В. Голубцова, А. А. Подошевка*

Компьютерный дизайн *М. М. Дударева, Е. В. Ковалевская,  
Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 17.04.2024. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 29,53. Уч.-изд. л. 31,69. Тираж 30 экз. Заказ № 333.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.