ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

Научно-методический журнал *Периодичность – 4 раза в год*
Издается с октября 2001 г.

1(82) 2024

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

БУРИН А. А., ПОБОЛЬ А. И., ЗАЛЕССКИЙ В. Г., ПОБОЛЬ И. Л. Электронно-лучевая сварка кулаков шарнира равных угловых скоростей автомобилей..... 5

ЖОЛОБОВ А. А., КЛЯУС О. Н., ИЛБОВНИКОВ К. А. К вопросу совершенствования конструкций расточных резцов..……..... 14

КОРОТЕЕВ А. О., ФЕТИСОВА Е. А., КОРОТЕЕВА А. А., ЛОПАТИНА А. А., ДОЛГАЯ В. Д. Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 ($Ar + CO_2 + SF_6$) .....…… 25

ЛЕБЕДИНСКИЙ Ю. А., БРАНОВИЦКИЙ А. М. Моделирование роста кристаллов с высокой степенью анизотропии в изменяющихся условиях кристаллизации.....……..... 35

ФЕДОСЕНКО А. С., ОЛЕНЦЕВИЧ А. С. Перспективные материалы на основе алюминия для послойного синтеза и наплавки..... 46

ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ГРОМЫКО П. Н., ГАЛЮЖИН Д. С., ГАЛЮЖИН М. А., ГУЛЯЕВ К. К. К вопросу оценки упругих деформаций звеньев прецессионной передачи типа 2К-Н…..…...…… 58

ЯСЮКОВИЧ Э. И. Имитационное моделирование управляемого курсового движения трехосных колесных машин……..... 68

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЛАРЬКИНА Т. С. Особенности идентификации параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости как объекта с распределенными объемными параметрами и неопределенностями..... 77

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПАНТЮШИНА В. Г., НОВИКОВ В. А. Анализ способов магнитографического контроля ферромагнитных объектов..... 87

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

ГАЛЮЖИН А. С., ЛОБИКОВА О. М. Математическая модель движения частицы воды в гравитационно-магнитном поле каплеуловителя вентиляционной установки..... 99

ФИЗИКА

ЛЯПИН А. И. Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении..... 108

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

АЛЕКСАНДРОВА С. А. Использование операционной модели SCOR для оценки роли и управления работой логистических посредников в цепях поставок..... 118

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014*
  для предприятий и организаций – 000142

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

BURIN A. A., POBOL A. I., ZALESSKY V. G., POBOL I. L.
Electron beam welding of vehicle constant velocity joints..... 5

ZHOLOBOV A. A., KLIAUS O. N., ILBOVNIKOV K. A.
On improving designs of boring cutters…….....……..... 14

KARATSEYEU A. O., FIATSISAVA E. A., KARATSEYEVA A. A., LAPATSINA A. A., DOUHAYA V. D. Features of electrode metal transfer during arc welding and surfacing with modification of protective gas atmosphere by SF_6 halide compound ($Ar + CO_2 + SF_6$)..... 25

LEBEDINSKY Y. A., BRANOVITSKY A. M. Simulation of crystal growth with a high degree of anisotropy under varying crystallization conditions.....…….…..... 35

FEDOSENKO A. S., OLIENTSEVICH A. S. Promising aluminum-based materials for layer-by-layer synthesis and surfacing……...…….. 46

KHATETOVSKY S. N., GROMYKO P. N., GALYUZHIN D. S., GALYUZHIN M. A., GULYAEV K. K. On estimating elastic deformations of links in 2K-H type precessional transmissions..... 58

YASYUKOVICH E. I. Simulation modeling of steerable directional movement of three-axle wheeled vehicles..…..……....….. 68

ELECTRICAL ENGINEERING

LARKINA T. S. Features of identifying parameters of a system for indirect induction heating of a liquid as an object with distributed volume parameters and uncertainties ……..... 77

INSTRUMENT MAKING

PANTYUSHINA V. G., NOVIKOV V. A. Analysis of methods for magnetographic inspection of ferromagnetic objects..... 87

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

GALYZHIN A. S., LOBIKOVA O. M. Mathematical model of a water particle moving in the gravitational magnetic field of a drift eliminator of a ventilation unit.....……..... 99

PHYSICS

LYAPIN A. I. Generalized model of elementary processes in the «cold» cathode region of a welding arc in vapor at atmospheric pressure..... 108

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

ALEKSANDROVA S. A. Using the SCOR operating model to assess the role and manage the performance of logistics intermediaries in supply chains..... 118

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-5-13

УДК 621.791

А. А. БУРИН
А. И. ПОБОЛЬ
В. Г. ЗАЛЕССКИЙ, *д-р физ.-мат. наук*
И. Л. ПОБОЛЬ, *д-р техн. наук*, *проф.*
Физико-технический институт НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КУЛАКОВ ШАРНИРА РАВНЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

Аннотация

Изучена возможность соединения с применением электронно-лучевой сварки элементов кулаков шарнира равных угловых скоростей, изготовленных из трудно свариваемой стали 40Х. Выявлены структурные особенности материала соединения при проведении сварки «холодного» изделия и с предварительным нагревом материала свариваемой детали. Проведены стендовые испытания на статическую прочность при кручении партии изготовленных изделий.

Ключевые слова:

электронно-лучевая сварка, шарнир равных угловых скоростей, структура, статическая прочность.

Для цитирования:

Электронно-лучевая сварка кулаков шарнира равных угловых скоростей автомобилей / А. А. Бурин, А. И. Поболь, В. Г. Залесский, И. Л. Поболь // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 5–13.

Введение

Первые публикации о возможностях электронно-лучевой сварки (ЭЛС) появились в конце 1950-х гг. [1–3], с тех пор этот метод привлекает постоянное внимание и широко используется для получения надежных соединений в деталях из большинства сталей, металлов и их сплавов. ЭЛС применяется для изготовления ответственных изделий авиакосмического назначения, ядерной энергетики и др. Появляются все новые применения этого практически неисчерпаемого метода высокоэнергетического воздействия. ЭЛС используется в «зеленой» энергетике, незаменима, в частности, при изготовлении деталей большой толщины в ветрогенераторах [4]. Нагрев материалов с использованием источников электронов накального и плазменного типов применяется для реализации широкого спектра технологий инженерии поверхности [5–7]. Огромный интерес проявляется к реализации аддитивных технологий выращивания изделий с использованием электронно-лучевого нагрева и исходного материала в виде порошка или проволоки, в том числе путем подачи в зону плавления проволок различного состава [8–10]. Применение именно электронного луча в качестве источника нагрева обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с другими вариантами аддитивных технологий (более высокие производительность процесса выращивания, качество материала полученной заготовки, возможность обрабатывать высокоактивные металлы и сплавы). Большое внимание

© Бурин А. А., Поболь А. И., Залесский В. Г., Поболь И. Л., 2024

уделяется получению соединений разнородных материалов (в том числе с применением промежуточных материалов) путем ЭЛС.

Для сварки применяется электронный пучок с удельной мощностью $10^4...5 \cdot 10^8$ Вт/см^2; чем больше толщина металла, тем она должна быть выше [1–3]. Основными преимуществами метода ЭЛС являются возможность, благодаря обеспечению высокой плотности энергии, получения глубокого сварного шва (до 200 мм и более) с минимальной шириной, высокая скорость сварки. Соотношение глубины проплавления и ширины шва легко регулируется. Затраты погонной энергии для получения идентичной небольшой глубины шва при ЭЛС примерно в 5 раз меньше, чем при дуговой сварке. При повышении глубины разница еще более существенна. Из-за малого удельного тепловложения в материал удается максимально снизить и даже практически устранить деформацию изделия. Благодаря легкой повторяемости режимов сварки гарантируется стабильность качества соединения. Имеется возможность избежать роста размеров зерна расплавленного металла в шве. Свойства сварных соединений при ЭЛС этих сталей в значительной степени определяются параметрами сварочного термического цикла: скоростью нагрева и охлаждения металла, длительностью пребывания выше температуры интенсивного роста зерна.

В последние годы ЭЛС все активнее используется для изготовления изделий основного производства машиностроительных предприятий страны (в ОАО «МТЗ», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Амкодор», ОАО «МЗКТ», УП «Минотор Сервис», ОАО «УКХ «БКМ» и др.). Применяется ЭЛС также при изготовлении ряда элементов эндопротезов тазобедренного сустава в ЗАО «Алтимед» [11]. Многолетним опытом применения изделий со сварными соединениями ЭЛС подтверждено обеспечение равнопрочности с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном шве и зоне термического влияния.

Между тем получение с использованием ЭЛС соединений материалов, относящихся к трудно свариваемым, в том числе сталей с достаточно высоким содержанием углерода, приходится решать применительно к конкретным типам изделий совместно конструкторам, технологам предприятий и специалистам, использующим оборудование ЭЛС. Для предотвращения образования остаточных деформаций в процессе изготовления изделий с использованием сварки с минимизацией материальных и временных затрат применяется конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния деталей. Такой метод использован при создании с использованием ЭЛС новой конструкции сверхпроводящего резонатора из ниобия [12]. Следует признать, что и в случае ЭЛС, при которой можно организовать точный контроль всех технологических параметров процесса, выбор их окончательных значений для сварки новых изделий должен выполняться путем сочетания моделирования и проведения экспериментов.

Результаты исследований

Сотрудниками ФТИ НАН Беларуси и ОАО «МАЗ» опробовано использование электронно-лучевой сварки при изготовлении деталей «Кулак внутренний». Задачами работы являлись упрощение конструкции шарнира равных угловых скоростей (ШРУС), снижение массы детали, отработка получения надежного соединения в этих ответственных изделиях путем ЭЛС и стендовые испытания на статическую прочность при кручении партии изготовленных изделий.

Шарниры равных угловых скоростей служат для передачи крутящего момента от двигателя на колеса автомобиля. В ОАО «МАЗ» на основе анализа

возможностей создания с применением ЭЛС равнопрочных узлов из менее массивных (по сравнению с используемыми) заготовок разработана новая конструкция внутреннего кулака (рис. 1). ШРУС из стали 40Х ГОСТ 4543–2016 имеют длину 735 мм, диаметр детали в зоне сварки 55 мм. Масса изделия новой конструкции 11,7 кг, что, по информации разработчика, на 17 % меньше массы кулака, изготавливаемого по применяемой технологии (14,2 кг). При выполнении ЭЛС требовалось обеспечить высокий уровень качества сварного шва.

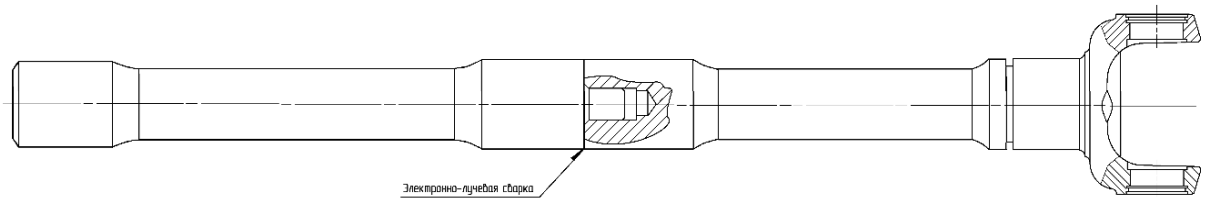


Рис. 1. Эскиз внутреннего кулака новой конструкции

Широко используемая конструкционная сталь 40Х относится к группе трудно свариваемых, чувствительна к перепадам температур и образованию трещин, раковин и прочих дефектов. При проведении электронно-лучевой обработки в режиме скоростного нагрева с расплавлением металла в зоне сварного шва (длительность процесса передачи тепла в свариваемый металл при ЭЛС исследуемого ШРУС составляет порядка 10 с) температура остальной части заготовки практически не повышается и соответствует температуре окружающей среды. Такой вариант можно назвать сваркой «холодного» изделия. В результате после выключения источника нагрева (луча) имеются условия для реализации процесса самозакалки путем отвода тепла в холодную массу. В сварном шве стали 40Х при таких условиях формируются закалочные структуры с твердостью HV 560...750. Этот метод используется для закалки поверхности деталей машиностроения с получением слоев толщиной 0,2...1,7 мм [5, 6]. При проведении ЭЛС изделий из этой стали с получением швов глубиной 3 мм и более в сварном соединении образуются трещины.

Распространенным методом предотвращения дефектов при всех методах сварки является предварительный нагрев детали. В случае традиционных методов сварки применяют нагрев заготовки газовой горелкой или в печи. Применение электронно-лучевого источника воздействия дает возможность нагревать все изделие до требуемой температуры благодаря возможности точного знания количества теплоты, передаваемой детали, путем контроля всех параметров электронно-лучевой обработки.

Проведение электронно-лучевой сварки

ЭЛС выполнялась в ФТИ НАН Беларуси на установке ЭЛУ-9Б/PZ ЕВ 2,5-15 (рис. 2) вертикально направляемым лучом. Кулаки шарнира размещались в горизонтальном положении в оснастке, скорость вращения деталей регулировалась. Рациональные режимы ЭЛС (мощность луча 6,3 кВт, расстояние от среза электронной пушки 450 мм до поверхности, ток фокусирования 750 мА, скорость перемещения зоны нагрева 10 мм/с) отработаны с использованием образцов-свидетелей, имитирующих зону выполнения сварки (рис. 3). ЭЛС выполнялась без разделки кромок и использования присадочных материалов.

Рис. 2. Установка ЭЛУ-9Б/PZ ЕВ 2,5-15

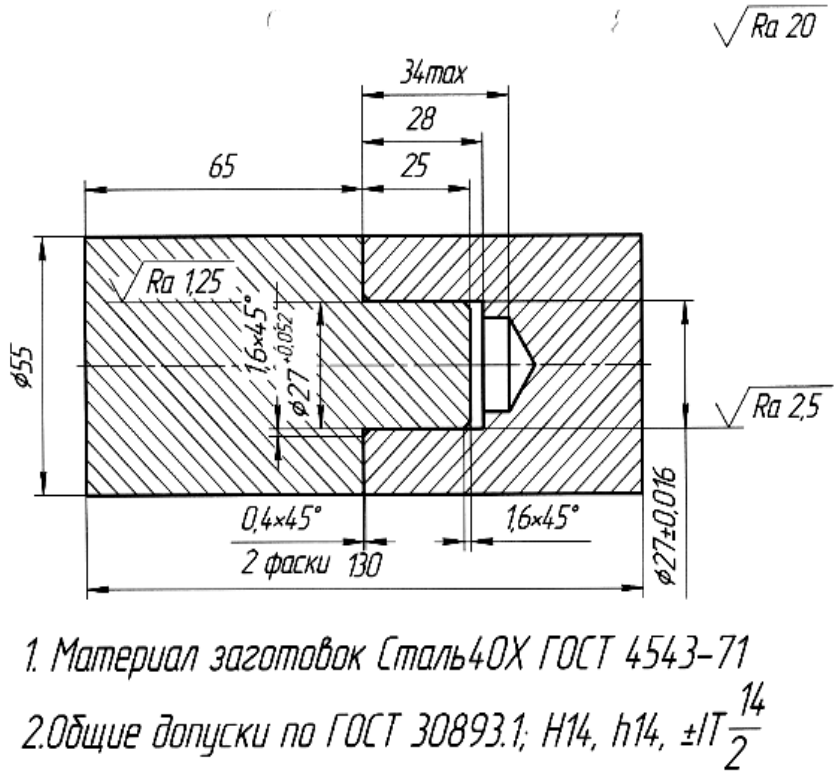


Рис. 3. Эскиз образца-свидетеля

Предварительный подогрев детали в области свариваемого участка проводился развернутым расфокусированным электронным лучом. Луч – удобный в применении источник нагрева изделия непосредственно перед выполнением операции ЭЛС. Подогрев до заранее определенной температуры снижает скорость охлаждения материала в зоне соединения и предотвращает формирование в стали закалочных структур.

Металлографические и микродюрометрические исследования зоны соединения

Внешний вид шва ЭЛС приведен на рис. 4, *а*. Методом эрозионного разрезания проволокой с последующим шлифованием и полированием изготовлены шлифы образцов в направлении, поперечном сварному шву (фото поперечного сечения участка в районе сварного шва показано на рис. 4, *б*).

а) *б*)

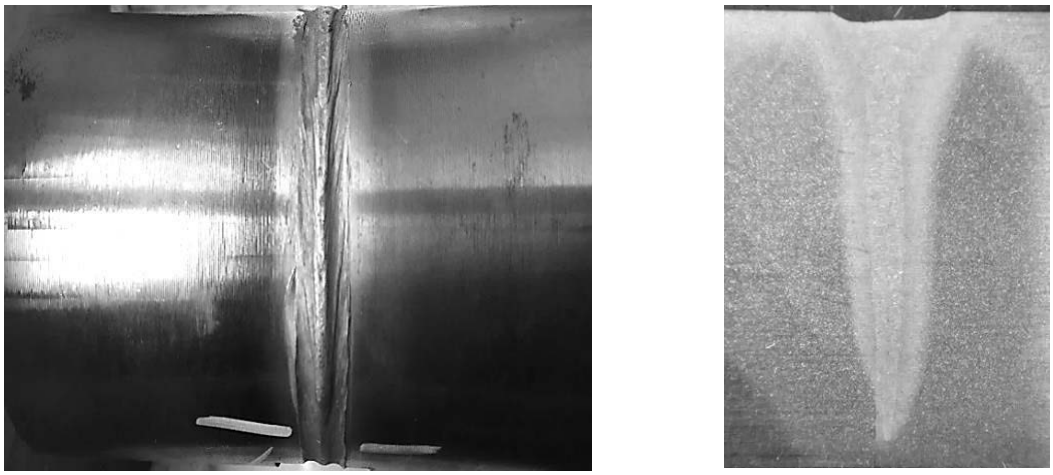


Рис. 4. Шов ЭЛС (× 3): *а* – внешний вид; *б* – поперечное сечение

В соединении выделяются непосредственно сварной шов (его границы соответствуют более темным участкам) и зона термического влияния (примыкающие к шву более светлые участки). Сварной шов включает верхнюю расширенную часть и зону проплавления со стенками, близкими к параллельным. Глубина сварного шва (определялась на поперечном шлифе образца-свидетеля) составляла 18 мм. Его ширина в верхней части шва равна 8 мм и 1,5...0,8 мм – в средней и нижней.

На рис. 5 показаны профили микротвердости материала сварного соединения. Приведенные значения получены при измерении вдоль линии, параллельной поверхности, на расстоянии 5,5 и 16,5 мм от неё. Видно некоторое повышение твердости стали с HV 230 (что соответствует основному материалу) до HV 350. При выполнении стандартной объемной закалки твердость стали 40Х достигает величины HV 560...750 в зависимости от режимов термообработки. Такой небольшой рост твердости при ЭЛС обеспечен предварительным нагревом зоны сварки и относительно низкой скоростью охлаждения металла шва путем отвода тепла в менее нагретые части детали. Структура материала шва соответствует троосто-сорбиту (рис. 6).

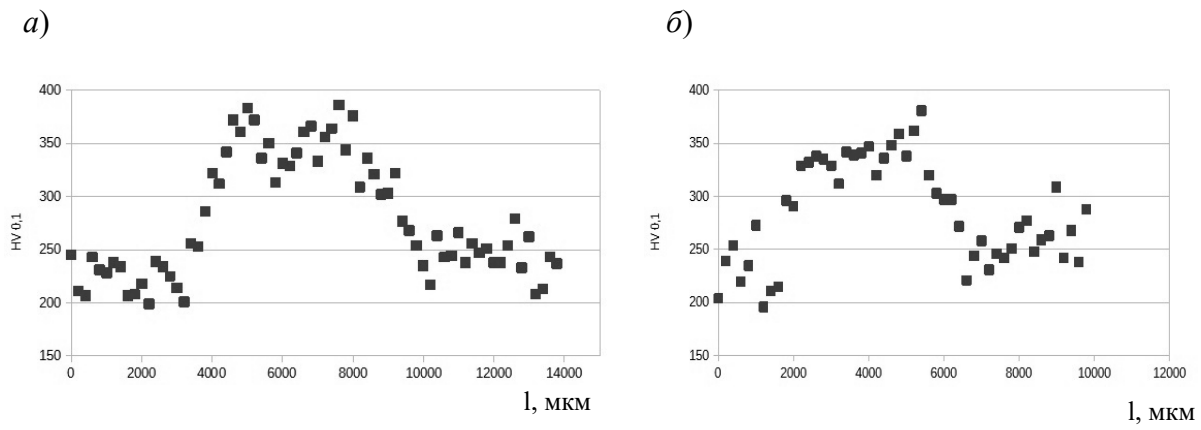


Рис. 5. Распределение микротвердости стали в сварном соединении на расстоянии 5,5 мм (*а*) и 16,5 мм (*б*) от поверхности образца

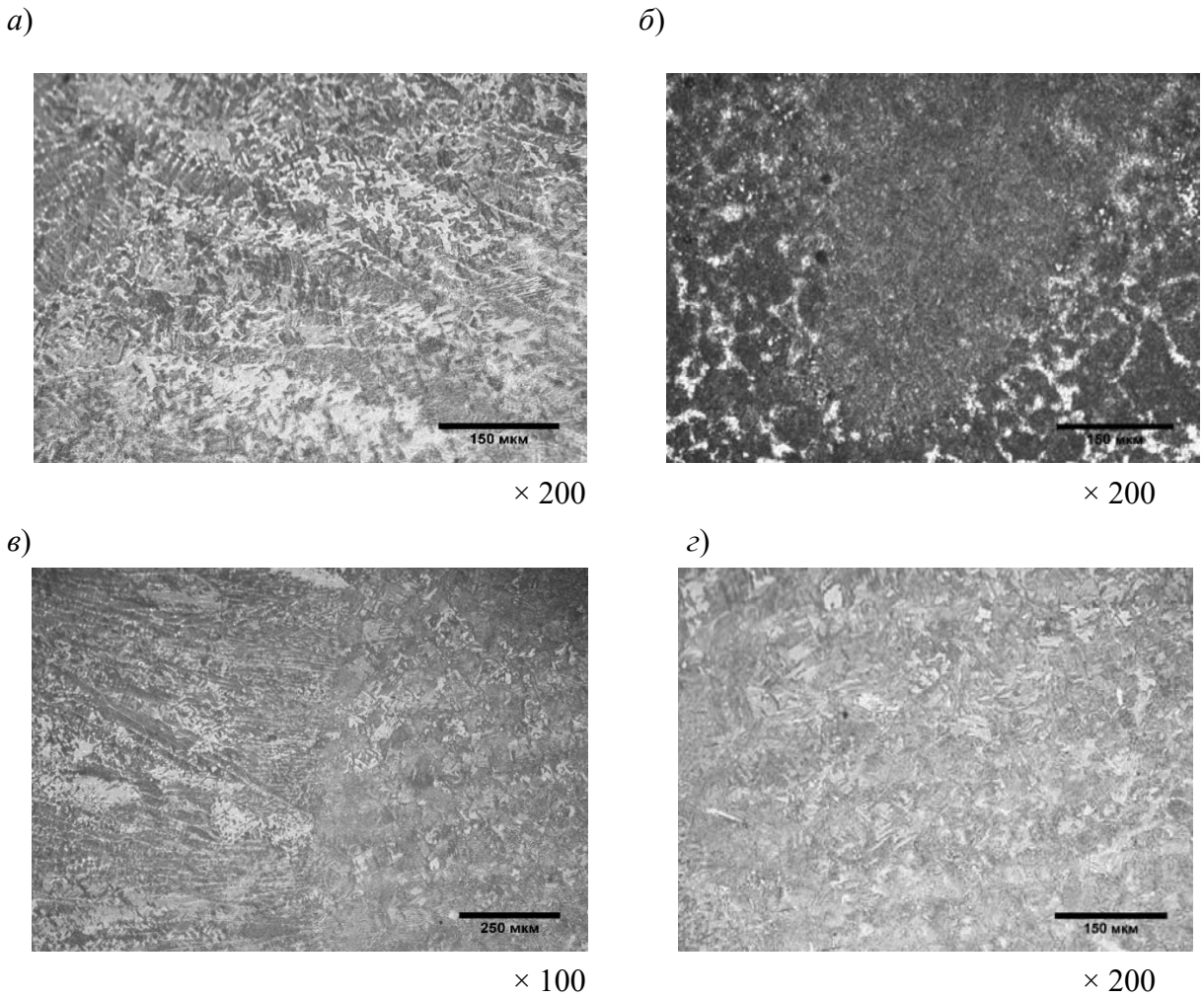


Рис. 6. Микроструктура материала сварного соединения стали 40Х: средняя часть шва (*а*), корень шва (*б*), переходная зона между швом и зоной термического влияния (*в*) и зона термического влияния вблизи средней часть шва (*г*)

Испытания на статическую прочность деталей

После ЭЛС заготовок и окончательного механического изготовления деталей в ОАО «МАЗ» поверхность кулаков шарнира подвергалась закалке ТВЧ с получением глубины закалённого слоя 3,0...3,2 мм с твердостью материала 54...56 HRC.

Проведены стендовые испытания на статическую прочность при кручении партии изготовленных изделий (выполнены в соответствии с ГОСТ 3565–80 *Металлы. Метод испытания на кручение*). Схема стенда и места подключения датчиков крутящего момента и угла закручивания вала представлены на рис. 7.

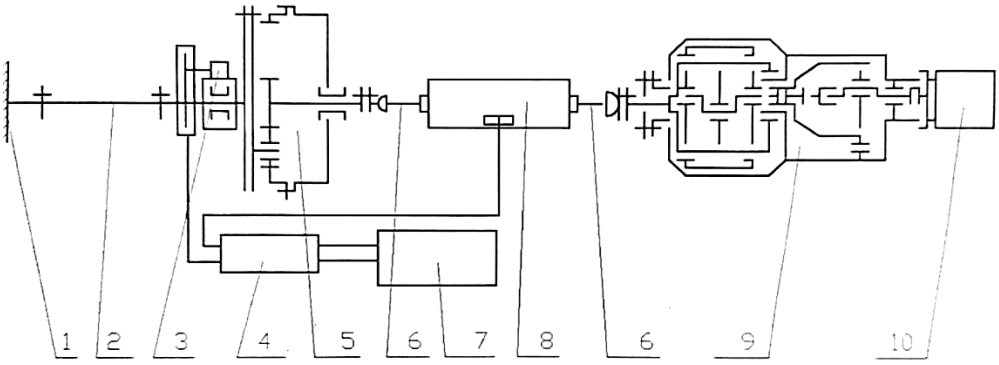


Рис. 7. Кинематическая схема стенда для проведения испытаний кулаков внутренних на статическую прочность при кручении: 1 – стойка; 2 – испытуемый шарнир; 3 – датчик угла поворота; 4 – блок тензоусилителей; 5 – планетарный редуктор; 6 – карданный вал; 7 – многоканальная измерительная система; 8 – датчик крутящего момента; 9 – планетарный редуктор; 10 – электродвигатель

Регистрировались крутящий момент на приводном валу стенда и угол поворота приводного вала стенда. Для измерений и записи значений крутящего момента и угла поворота приводного вала стенда использовалась многоканальная измерительная система DATRON MEEP-10 в комплекте с блоком тензоусилителей KWS 501. Запись сигналов от датчиков крутящего момента и угла поворота приводного вала стенда осуществлялась с частотой 10 Гц.

Зависимость угла закручивания одного из испытанных внутренних кулаков от величины нагружающего крутящего момента представлена на рис. 8. Ход зависимости для всех шести внутренних кулаков практически идентичен.

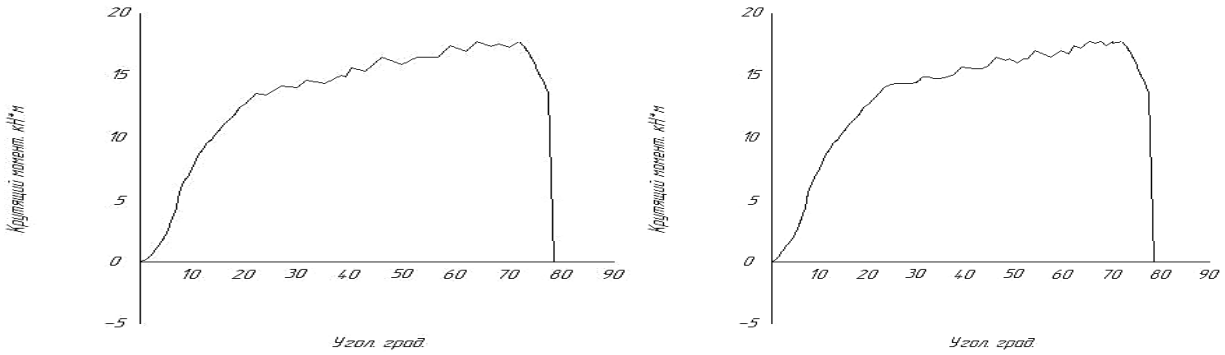


Рис. 8. Зависимость величины крутящего момента от угла закручивания внутреннего левого (*а*) и внутреннего правого (*б*) кулаков

При испытаниях внутренних правых и левых кулаков, изготовленных с использованием ЭЛС, начало пластической деформации наступало при крутящем моменте 14,09...16,78 кН·м, предел прочности – при моменте 18,11...19,54 кН·м (табл. 1). По конструкторской документации сварной шов кулаков должен обеспечивать прочность при максимальном крутящем моменте 18,0 кН·м.

Табл. 1. Результаты испытаний кулаков внутренних на статическую прочность при кручении

Номер образца	Крутящий момент $M_{кр}$, кН·м (начало пластической деформации)	Крутящий момент $M_{кр}$, кН·м (предел прочности)
1	15,09	18,59
2	14,09	18,11
3	16,78	19,54
4	14,87	19,05
5	15,43	19,03
6	16,14	19,07

При испытаниях на статическую прочность во всех случаях происходило разрушение внутренних кулаков (левых и правых) в месте перехода тела кулака в вилку и деформация вилки. Разрушения (повреждения) кулаков на участке расположения сварного шва отсутствовали. Таким образом, все испытанные кулаки по статической прочности при кручении соответствуют требованиям конструкторской документации.

В ОАО «МАЗ» рассматривается вопрос об использовании ШРУС новой конструкции в серийных автомобилях.

Выводы

Предварительный подогрев деталей, изготовленных из трудно свариваемых сталей (в частности, 40Х), в области сварного шва непосредственно перед выполнением операции ЭЛС с использованием развернутого расфокусированного электронного луча дает возможность формировать бездефектные соединения на тяжелонагруженных изделиях.

Стендовые испытания на статическую прочность партии изготовленных кулаков ШРУС при кручении подтвердили высокие прочностные свойства сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой.

Применение ЭЛС дает возможность упростить конструкцию, снизить массу кулака ШРУС на 17 % и обеспечивает достижение требуемых высоких прочностных свойств изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schiller, S.** Elektronenstrahltechnologie Wissenschaftliche / S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer. – Stuttgart: Verlagsgesellschaft, 1977. – 400 s.

2. **Рыкалин, Н. Н.** Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин, И. В. Зуев, А. А. Углов. – Москва: Машиностроение, 1978. – 239 с.

3. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.

4. Fatigue performance of longitudinal seam welds made by rapidweld electron beam welding for use in monopiles / C. Johnston [et al.] // WindEurope Bilbao. – Conference & Exhibition, Bilbao, 5–7 April 2022.

5. **Шипко, А. А.** Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А. А. Шипко, И. Л. Поболь, И. Г. Урбан. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.

6. **Zenker, R.** Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung / R. Zenker. – Planegg: Pro-Beam, 2003. – 72 s.

7. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / Н. А. Бабинов [и др.]. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2014. – 263 с.

8. Особенности структурообразования заготовок, полученных методом электронно-лучевой послойной наплавки из стали аустенитного класса / А. А. Бакиновский [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: материалы 2 Междунар. конф., Москва, 14–17 нояб. 2017 г. – Москва: МЭИ, 2017. – С. 282–291.

9. Сайт компании «Червона хвиля» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://xbeam3d.com. – Дата доступа: 21.01.2024.

10. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций / А. В. Щербаков [и др.]. – Москва: МЭИ, 2022. – 675 с.

11. Электронно-лучевая сварка заготовок эндопротезов типа Остина Мура из сплава системы Co–Cr–Mo / А. А. Бакиновский [и др.] // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. – Брест: БрГТУ, 2019. – С. 132–135.

12. **Поболь, А. И.** Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния деталей из Cu и Nb после электронно-лучевой сварки. Ч. 1: Свойства материалов / А. И. Поболь // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 кн. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2020. – Кн. 2. – С. 213–225.

Статья сдана в редакцию 12 февраля 2024 года

Контакты:
burinalexandr@gmail.com (Бурин Александр Алексеевич);
alex.pobol@gmail.com (Поболь Алексей Игоревич);
v.zalesski@phti.by **(**Залесский Виталий Геннадьевич);
pobol.igor@gmail.com (Поболь Игорь Леонидович).

A. A. BURIN*, *A. I. POBOL*, *V. G. ZALESSKY*, *I. L. POBOL

ELECTRON BEAM WELDING OF VEHICLE CONSTANT VELOCITY JOINTS

Abstract

The possibility of connecting elements of the constant velocity joint made of difficult-to-weld 40X steel by using electron beam welding has been studied. The structural features of the joint material have been revealed when welding a `cold` product and with preheating the same material of the part being welded. Bench tests for static torsional strength of a batch of welded products have been carried out.

Keywords:

electron beam welding, constant velocity joint, structure, static strength.

For citation:

Electron beam welding of vehicle constant velocity joints / A. A. Burin, A. I. Pobol, V. G. Zalessky, I. L. Pobol // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 5–13.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-14-24

УДК 621.95.01

А. А. ЖОЛОБОВ, *канд. техн. наук*, *проф.*
О. Н. КЛЯУС
К. А. ИЛБОВНИКОВ
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ РАСТОЧНЫХ РЕЗЦОВ

Аннотация

Созданы расточные резцы более жестких конструкций за счет разработки переходных участков и улучшения геометрии конической части резца путем моделирования упругого смещения различных конструкций резцов при формировании отверстий. Предложена новая форма державки с тороидальным диском и бочкообразной конической частью, увеличившая сопротивляемость силам резания. Определены оптимальные геометрические формы и параметры резцов с наименьшим упругим смещением при формировании отверстий.

Ключевые слова:

жесткость расточного резца, конструкции расточного резца, упругое смещение, переходной участок.

Для цитирования:

Жолобов, А. А. К вопросу совершенствования конструкций расточных резцов / А. А. Жолобов, О. Н. Кляус, К. А. Илбовников // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 14–24.

Введение

На протяжении длительного времени процесс растачивания отверстий остается консервативным в отношении конструкции инструментов. Во многих странах, в том числе и в России, существуют стандарты (например, ГОСТ), которые устанавливают определенную конфигурацию этих инструментов, производящихся в огромных объемах, достигающих десятков тысяч экземпляров ежегодно.

Однако анализ упругой деформации расточных резцов, изготовленных в соответствии с ГОСТ, под воздействием сил резания показывает, что общепринятая конструкция стержня инструмента не является оптимальной для сопротивления силам резания, что стало основанием для дальнейшего улучшения его конструкции.

Следует отметить, что в этой области также проводятся определенные исследования и разработки.

1. Патент [1] предлагает универсальный токарный резец, который может использоваться для обработки как наружных, так и внутренних поверхностей деталей. Инструмент снабжен двумя сменными режущими пластинами, одна из которых используется для наружного точения, вторая – для внутреннего, установленными под углом друг к другу. Возможность поворота резца на 90° и перемещения режущих пластин позволяет оперативно переходить от одного технологического перехода к другому. Для дополнительной жесткости резца ось цилиндрической части державки смещена вверх относительно прямоугольной.

2. Патент [2] описывает расточной инструмент, содержащий круглую державку и головку с режущей пластиной, режущая кромка которой расположена в

© Жолобов А. А., Кляус О. Н., Илбовников К. А., 2024

плоскости горизонтального осевого сечения державки. Резец снабжен торсионным валиком, на первом и втором конце которого выполнены шлицы, параллельные его оси, причем первый конец валика имеет гладкий цилиндрический поясок, размещенный между шлицами и телом валика. Второй конец валика с торцевой стороны последнего имеет цилиндрический хвостовик с резьбой. При этом державка выполнена с круглой осевой полостью, в её первом конце выполнена цилиндрическая выточка, на втором конце закреплена втулка со шлицевым отверстием. Торсионный валик установлен в полости державки, причем его цилиндрический поясок размещен в цилиндрической выточке полости, его второй конец размещен во втулке со шлицевым отверстием. Головка резца закреплена на шлицах первого конца торсионного валика, а валик закреплен в державке гайками, установленными на его резьбовом хвостовике с упором на торец втулки со шлицевым отверстием. Авторы утверждают, что жесткость конструкции увеличивается за счет применения торсионного валика.

3. Патент [3] предлагает конструкцию расточного инструмента, в корпусе которого установлены: держатель режущего элемента цилиндрической формы с радиальными и шпоночным пазами; микрометрический винт с крепежной шайбой и пружиной между ними; крепежный винт для фиксации держателя режущего элемента в виде двух гаек и винта; режущий блок с цилиндрическим хвостовиком, закрепленный в держателе режущего элемента винтами для ограничения радиального перемещения держателя режущего элемента в корпусе. На головке винта имеется шкала, а на корпусе – индикаторная линейка. При вращении микрометрического винта режущий блок перемещается вдоль держателя режущего элемента, а радиальные и шпоночный пазы держателя режущего элемента позволяют эффективно закреплять режущий инструмент. Повышение жесткости инструмента и, как следствие, точности обработки осуществляется путем исключения зазоров, возникающих в микрометрической резьбовой паре.

Подобные патенты могут быть полезны при разработке новых инструментов для растачивания отверстий в целях повышения производительности, точности и эффективности этого процесса.

С учетом вышеизложенного, для формирования точных отверстий с высоким качеством поверхности существует определенная возможность в улучшении конструкций расточных резцов с учетом вышеприведенных и других разработок.

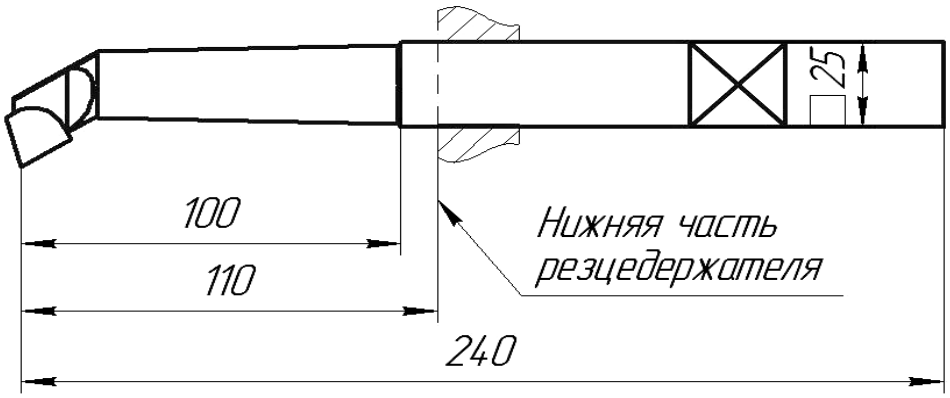
Принимая во внимание все вышеизложенное, по аналогии с [4], на основе созданной твердотельной модели расточного резца были разработаны модели для исследования, представленные на рис. 1. Причем размеры геометрических параметров переходного участка принимались таким образом, чтобы они не превышали наименьший диаметр растачиваемого отверстия, рекомендуемого [5].

Задача исследований заключается в подборе оптимальной геометрической формы и параметров резца с целью обеспечения минимально возможного упругого смещения вершины рабочей части пластины под воздействием сил резания.

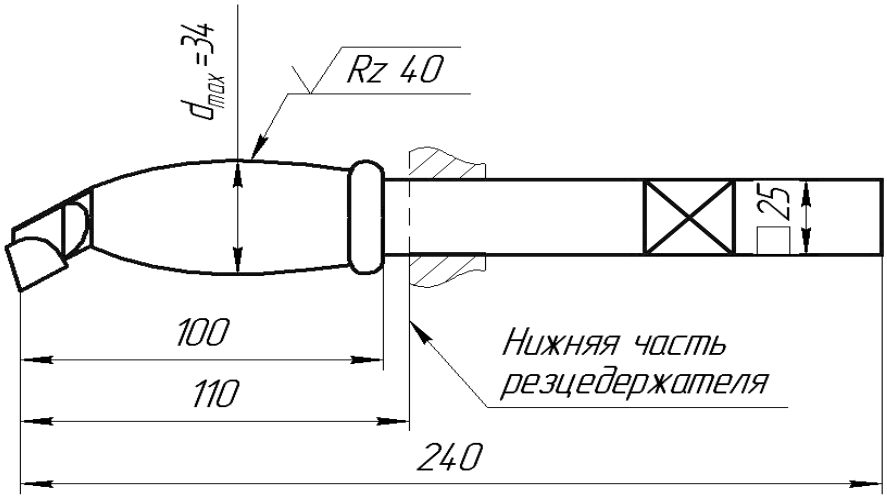
К вопросу выбора оптимальной геометрии переходного участка в виде тороидального диска

Результаты исследований, полученные в [4], показали, что жесткость расточного резца с переходным участком в виде конуса выше, чем стандартного. В связи с этим возникло предположение о возможности получения более жесткого инструмента путем внедрения переходного участка в виде тороидального диска и подбора его основных параметров.

а)



б)



в)

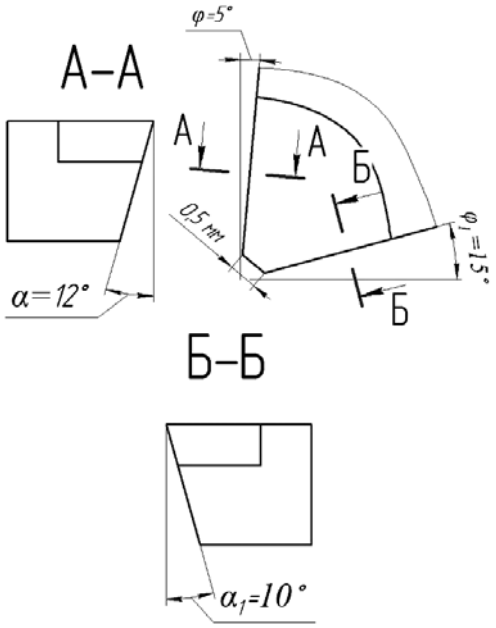


Рис. 1. Конструктивные формы исследуемых инструментов: *а* – резца, выполненного по [5]; *б* – то же по [6]; *в* – углы заточки режущей пластины

Машиностроение

В основе выбора оптимальной геометрии переходного участка лежит величина упругого смещения вершины режущей пластины в зависимости от изменения его геометрии. Чем меньше эта величина, тем более жесткой является конструкция. Вместе с тем следует учитывать тот факт, что стружка, получаемая в результате снятия припуска, должна иметь возможность свободного удаления из зоны резания. Другими словами, между инструментом и обрабатываемым им отверстием должен быть зазор, величина которого равна или больше глубины резания. На основании этого анализа получается следующее выражение:

$$R_{\min} \le R \le \frac{d}{2} - t - h_1, \quad (1)$$

где h_1 – половина высоты державки [5], мм; R – радиус кривизны, мм; t – глубина резания, мм; d – диаметр формируемого отверстия.

Необходимо отметить тот факт, что геометрическая форма тороидального диска сохраняется при выполнении условия

$$l = 2 \cdot R_{\min}, \quad (2)$$

где $R_{\min}$ – минимально возможный радиус кривизны.

В противном случае переходный участок имеет несколько иную форму, которая в статье не рассматривается. Таким образом, $R_{\min}$ = 0,5 мм при $l = l_{\min}$ = 1 мм.

На рис. 2 представлены варианты расположения переходного участка на резце.

а)

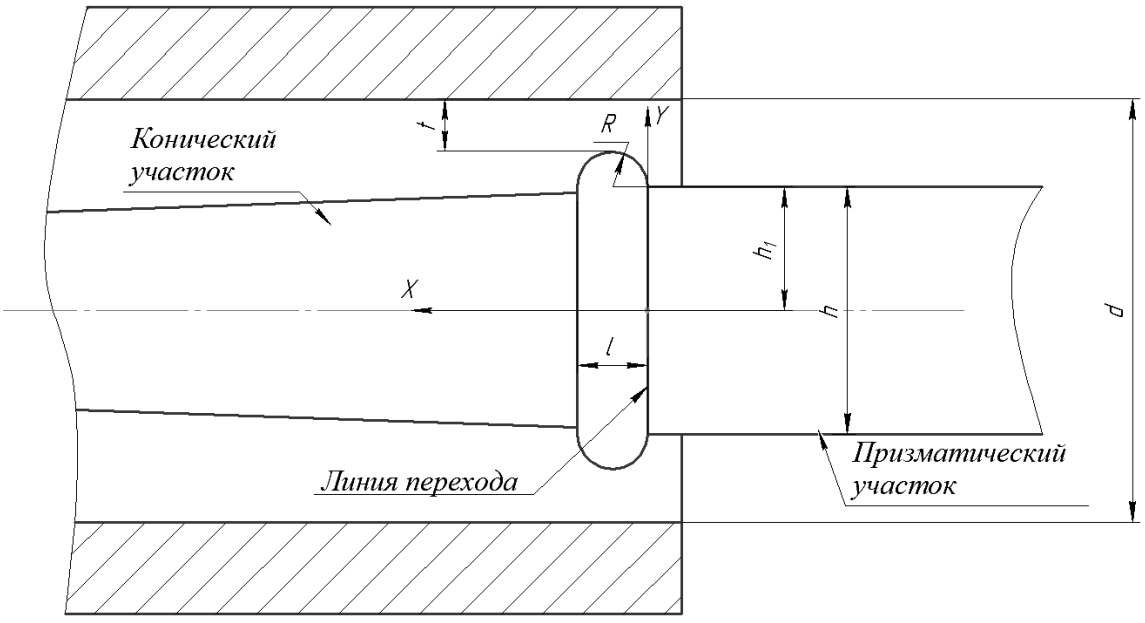
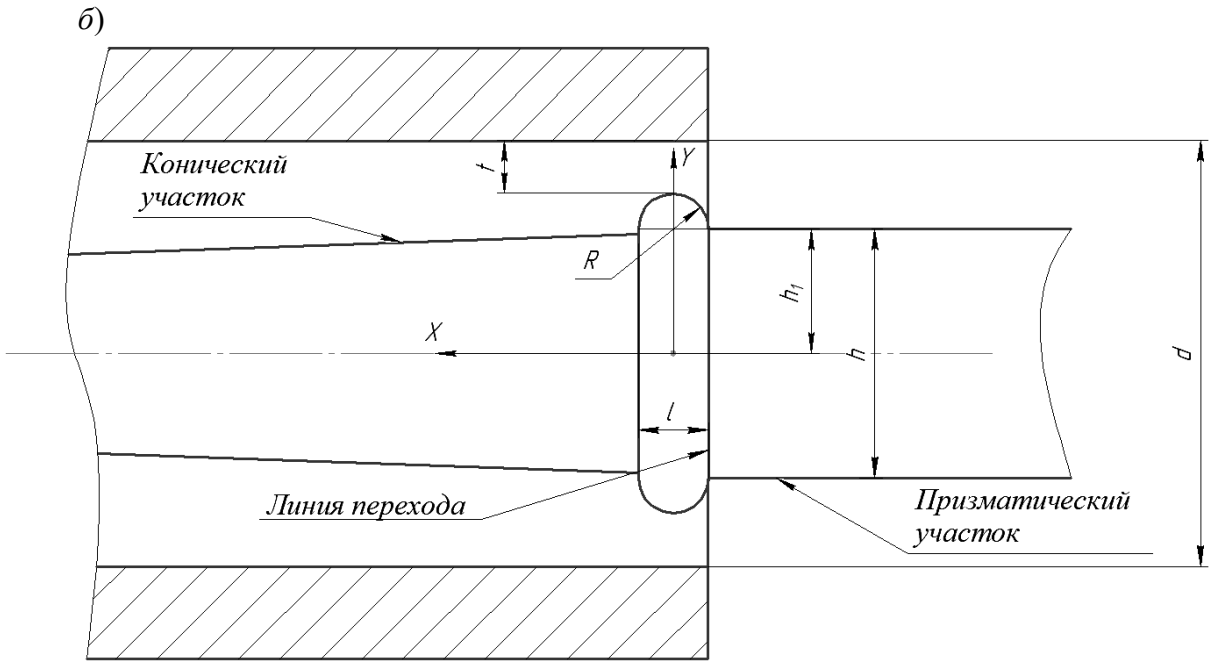


Рис. 2. Параметры переходного участка расточного резца с твердосплавной пластиной



Окончание рис. 2

Для определения упругого смещения вершины режущей кромки твердосплавной пластины необходимо принять определенные исходные данные, в качестве которых в рассматриваемом примере установлены: диаметр обработанного отверстия d = 40 мм; длина отверстия l = 95 мм; длина вылета расточного резца L = 100 мм, а также принять дополненные расчетами достаточно жесткие режимы резания [7, 8]: глубина резания t = 3 мм; подача s = 0,16 мм/об; скорость резания V = 180 м/мин, что соответствует P_x = 459 Н; P_y = 463 Н; P_z = 867 Н; h_1 = 12,5 мм.

Тогда, исходя из выражения (1), с учетом обозначенных исходных данных,

$$0{,}5 \le R \le \frac{d}{2} - t - h_1;$$

$$0{,}5 \le R \le \frac{40}{2} - 3 - 12{,}5;$$

$$0{,}5 \le R \le 20 - 3 - 12{,}5;$$

$$0{,}5 \le R \le 4{,}5. \qquad (3)$$

В результате инженерного анализа в САПР SolidWorks Simulation величина упругого смещения вершины режущей пластины расточного резца Δ_y с переходным участком в виде тороидального диска в зависимости от изменения геометрии переходного участка при h_1 = 12,5 мм:

R = 0,5 мм, l = 1 мм, Δ_y = 0,1654 мм (см. рис. 2, *а*), Δ_y = 0,1662 мм (см. рис. 2, *б*);

R = 1,5 мм, l = 3 мм, Δ_y = 0,1628 мм (см. рис. 2, *а*), Δ_y = 0,1644 мм (см. рис. 2, *б*);

R = 2,5 мм, l = 5 мм, Δ_y = 0,1600 мм (см. рис. 2, *а*), Δ_y = 0,1627 мм (см. рис. 2, *б*);

R = 3,5 мм, l = 7 мм, Δ_y = 0,1569 мм (см. рис. 2, *а*), Δ_y = 0,1615 мм (см. рис. 2, *б*);

R = 4,5 мм, l = 9 мм, Δ_y = 0,1533 мм (см. рис. 2, *а*), Δ_y = 0,1602 мм (см. рис. 2, *б*).

Таким образом, исходя из полученных значений при h_1 = 12,5 мм, видно, что жесткость инструмента повышается при увеличении радиуса кривизны с R = 0,5 мм до R = 4,5 мм. Причем эта величина в статике составляет порядка 7 мкм. Однако в динамике процесса резания эта величина может быть значительно большей и существенно влиять на точность формируемого отверстия.

Поскольку жесткость инструмента (см. рис. 2) по варианту *а* больше, чем по варианту *б*, то в качестве наиболее эффективного варианта исполнения переходного участка принимается вариант *а*. Соответственно, оптимальным параметром переходного участка является его расположение по варианту *а* с $R = 4{,}5$ мм и $l = 9$ мм.

Сборная твердотельная модель расточного резца с твердосплавной пластиной и переходным участком в виде тороидального диска представлена на рис. 3.

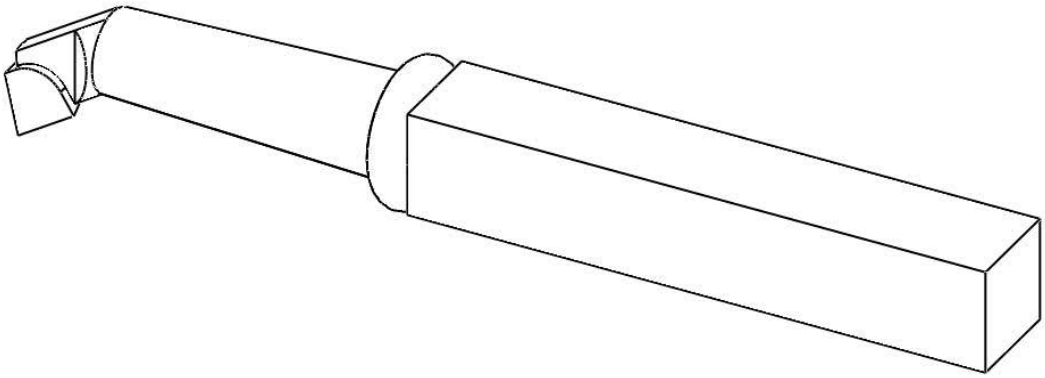


Рис. 3. Сборная твердотельная модель расточного резца с твердосплавной пластиной и переходным участком в виде тороидального диска

Совсем нетрудно предположить, что коническая часть расточного резца, соединенная с призматической, может иметь и бочкообразную геометрическую форму. В связи с этим возникает необходимость подбора ее оптимальной геометрии.

К определению оптимальной геометрии бочкообразной части с переходным участком в виде тороидального диска

Определение оптимальной геометрии бочкообразного исполнения рабочей части инструмента для получения наиболее жесткой конструкции осуществляется путем изменения конической части державки резца таким образом, чтобы получить некоторую дугу бочки (рис. 4).

На рис. 4 представлена бочкообразная форма, на которой определена величина h_2, представляющая собой наибольшее расстояние от точки на дуге до оси инструмента.

Изменяя значения расстояния h_2, можно получить любой радиус кривизны дуги. Причем максимальное значение величины h_2 определяется из условия

$$h_1 \le h_2 \le \frac{d}{2} - t, \qquad (4)$$

где h_1 – половина высоты державки, мм; d – диаметр обработанного отверстия, $d = 40$ мм.

Тогда в рассматриваемом случае

$$\frac{25}{2} \le h_2 \le \frac{40}{2} - 3;$$
$$12{,}5 \le h_2 \le 20 - 3;$$
$$12{,}5 \le h_2 \le 17 \text{ мм}. \qquad (5)$$

Определение наиболее жесткой конструкции расточного резца при разных значениях h_2 осуществляется путем

выявления минимального значения упругого смещения вершины режущей кромки твердосплавной пластины при исходных данных, принятых из предыдущего примера.

На основании значений расстояния h_2, указанных в выражении (5), и упругого смещения вершины режущей кромки твердосплавной пластины Δ_y составлена табл. 1.

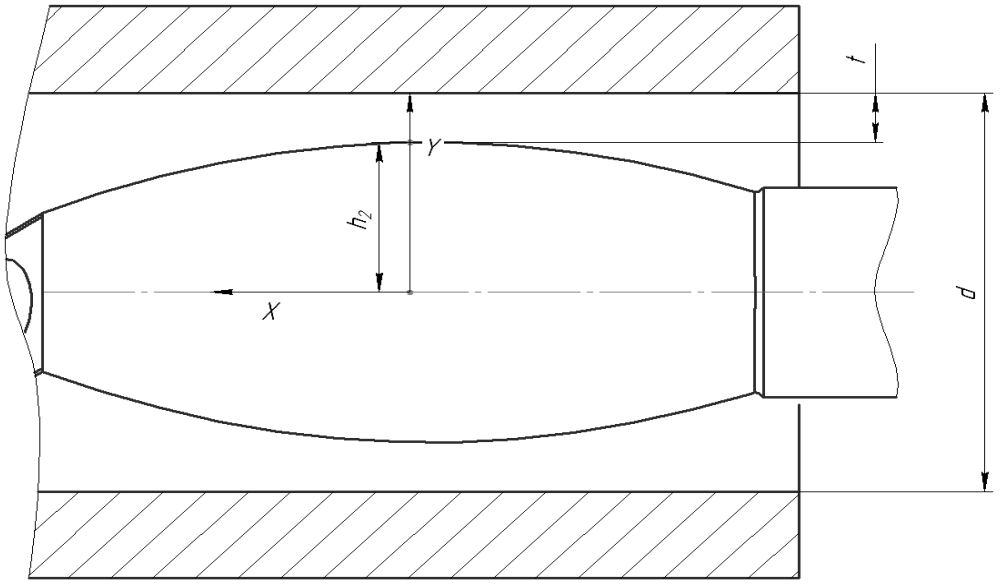


Рис. 4. Параметры бочкообразной части расточного резца с твердосплавной пластиной

Табл. 1. Значения расстояния h_2 и упругого смещения вершины режущей кромки твердосплавной пластины Δ_y при изменении значений координаты Y

Значение расстояния h_2, мм	Упругое смещение вершины режущей кромки твердосплавной пластины Δ_y, мм
12,5	0,1232
13	0,1148
13,5	0,1076
14	0,1014
14,5	0,09607
15	0,09121
15,5	0,08706
16	0,08342
16,5	0,08011
17	0,07740

Следует отметить, что чем больше расстояние h_2, тем меньше упругое смещение вершины режущей кромки твердосплавной пластины Δ_y.

Из данных табл. 1 видно, что переход к конфигурации с бочкообразной конической частью резца существенно повышает сопротивление силам резания.

Исходя из значений табл. 1, при h_2 = 17 мм увеличение жесткости инструмента, в сравнении с инструментом с подобным параметром h_2 = 12,5 мм, составляет порядка 60 %, что является оптимальным параметром бочкообразной части резца для рассматриваемого примера. В результате осуществлен подбор оптимальной геометрии бочкообразной части расточного резца (рис. 5).

Установлено, что упругое смещение вершины расточного резца с конической рабочей частью (см. рис. 1, *а*) и r = 1 мм составляет Δ_y = 0,1661 мм, а с бочкообразной – при r = 1 мм (см. рис. 1, *б*) Δ_y = 0,07740 мм (т. е. более чем в 2 раза меньше), что позволяет ее рекомендовать для широкого использования.

В табл. 2 приведены данные по упругой деформации стержней рабочих резцов разной конфигурации при статическом нагружении, о чем уже указывалось ранее.

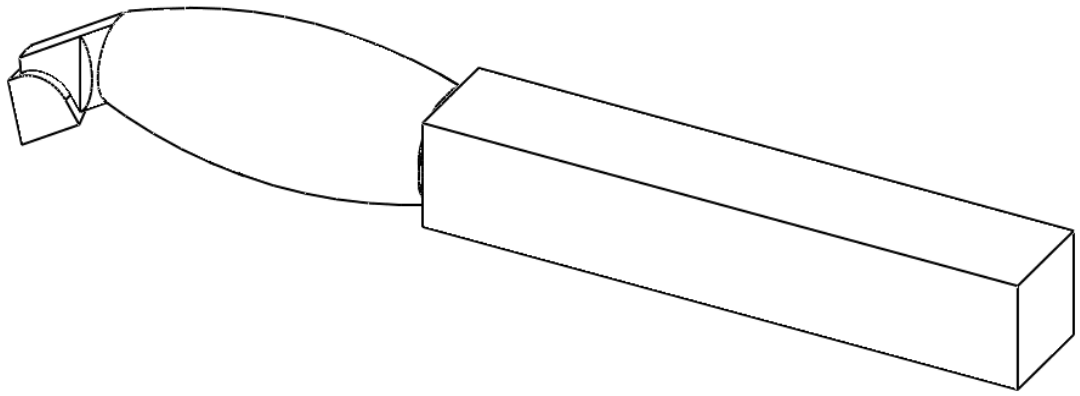


Рис. 5. Модель расточного резца с подобранной геометрией бочкообразной части

Табл. 2. Варианты выполнения расточного резца

Вариант выполнения переходного участка расточного резца	Стандартная конструкция расточного резца	Конструкция с конической рабочей частью и переходным участком в виде тороидального диска	Конструкция с бочкообразной рабочей частью	Конструкция с бочкообразной рабочей частью и переходным участком в виде тороидального диска
Δ_y, мм	0,1661	0,1533	0,07740	0,06821

Как видно из табл. 2, конструкция с бочкообразной рабочей частью и переходным участком в виде тороидального диска имеет наименьшую величину упругого смещения, а следовательно, и более высокую жесткость.

На указанную конструкцию получен патент [6].

С целью подтверждения результатов теоретических исследований были проведены экспериментальные исследования, для проведения которых были изготовлены расточные резцы по [5] и по [6]. На фотографии (рис. 6) показаны эти резцы в изготовленном виде.

а)

б)

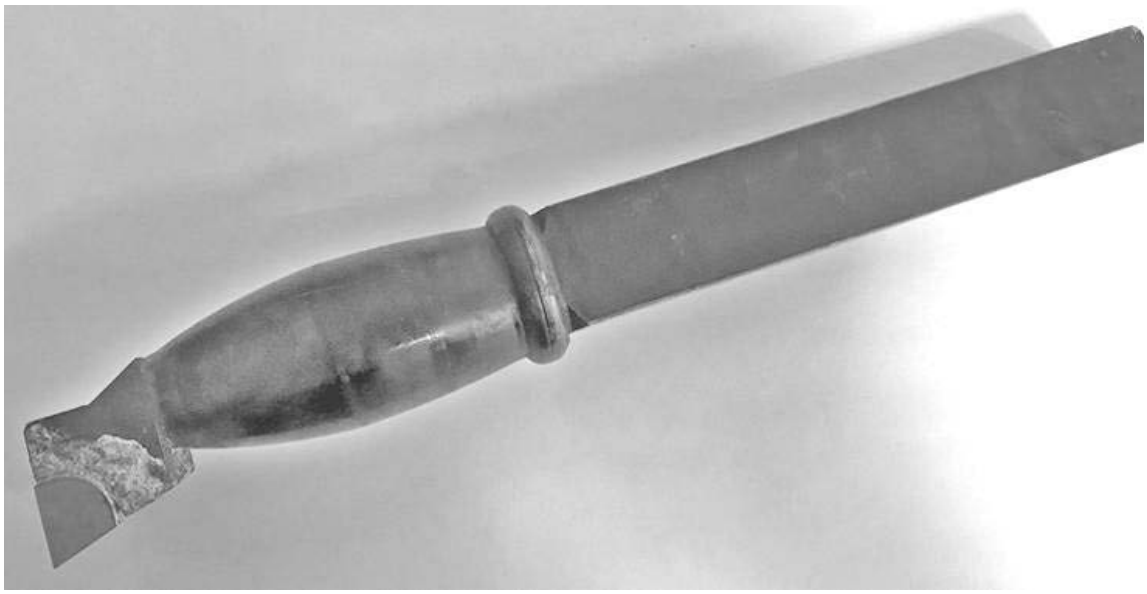


Рис. 6. Фотографии изготовленных резцов, выполненных по [5] (*а*) и по [6] (*б*)

Приведенные на фотографиях резцы выполнялись с абсолютно одинаковой призматической и конической частями по длине. Изготовление державок резцов производилось из одной части горячекатаного проката стали 45. Обработка точением и фрезерованием осуществлялась с одинаковыми режимами резания, а термообработка – нормализация обеих державок – производилась одновременно. Напайка пластины из твердого сплава Т15К6 и ее заточка тоже производились с теми же режимами. При установке резцов выдерживался вылет, равный 110 мм от нижней части резцедержателя. Закрепление инструментов производилось динамометрическим ключом с идентичным усилием.

В качестве образцов для проведения исследований принимался прокат горячекатаный из стали 45 диаметром 100 мм и длиной 75 мм, причем для

них, как и для заготовок резцов, принималась часть проката из одного первичного материала.

Заготовки для экспериментов перед растачиванием подвергались сверлению, рассверливанию до диаметра 45 мм при обильном охлаждении СОЖ, а затем трехразовому растачиванию до диаметра 50 мм с шероховатостью не более 1,25 мкм по *Ra*, растачивание тоже производилось с обильным охлаждением. Причем при растачивании подрезался торец, на который затем наносились риски и цифры, через 90°. В дальнейшем в районах этих рисок и цифр производилось измерение диаметров отверстий нутромером 50…100 мм с ценой деления 0,002 мм (ГОСТ 9244–75).

Методика исследований для чистоты эксперимента не предусматривала снятие заготовок для замеров с последующей новой установкой. Все исследования проводились на одном образце с постепенным увеличением его диаметра: 50, 52, 55, 59, 64 и 70 мм, т. е. с поэтапным увеличением глубины резания в пределах 1; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 мм.

Обработка производилась на токарном станке с ЧПУ модели 16К20Ф3С32, позволяющим очень точно программировать эти значения, как и скорость главного движения в 100 м/мин и подачу 0,1 мм/об. Перед началом эксперимента резцы подвергались приработке с целью снятия максимального износа главной режущей кромки и выхода в зону установившегося износа, для чего на специальных образцах из того же материала производилось растачивание резцами, используемыми в дальнейшем эксперименте, глубиной 1,5 мм (среднего по эксперименту), скорости резания 100 м/мин и подаче 0,1 мм/об детали. В данном случае каждый из резцов обрабатывал порядка 1000 м пути резания, что приблизительно и соответствует теоретическому, ранее установленному и опубликованному в различных источниках.

Причем замер производился по длине отверстия в трех местах, приблизительно в 5 мм от торцов образца и по его середине.

Анализ результатов экспериментов показывает, что для резцов с конфигурацией по [5] по расчету деформация при снятии припуска с 50 мм отверстия до 52 мм (t = 1 мм) равна 0,045 мм, по [6] – 0,019 мм, а на практике эта же величина составляет соответственно 0,066 и 0,028 мм, т. е., как и предполагалось, динамическая составляющая значительно больше определенной расчетами статической.

Выводы

Разработана конструкция расточного резца с бочкообразной рабочей частью и осуществлен подбор оптимальных параметров переходного участка в виде тороидального диска для определенных условий обработки.

При анализе полученных данных видно, что значение упругого смещения вершины режущей кромки для расточного резца с бочкообразной рабочей частью и переходным участком в виде тороидального диска между ней и призматической державкой равно 0,028 мм, что на 42 % меньше значения, полученного для расточного резца стандартной конструкции – 0,066 мм. Следовательно, при обработке отверстий модифицированный расточный резец обладает более высокой жесткостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Универсальный токарный резец для обработки наружных и внутренних поверхностей: пат. RU 0000174976 / Н. М. Цовбун, Н. С. Ли. – Опубл. 14.11.2017.

2. Расточной резец: пат. RU 2692537 / Я. Л. Либерман, М. А. Шишминцев. – Опубл. 25.06.2019.

3. Расточной резец: пат. BY 9108 / Н. Н. Попок, В. А. Терентьев, А. А. Герасимов. – Опубл. 30.04.2013.

4. **Жолобов, А. А.** Совершенствование конструкций расточных резцов / А. А. Жолобов, О. Н. Кляус // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 10. – С. 19–27.

5. **ГОСТ 18883–73.** Резцы токарные расточные с пластинами из твердого сплава для обработки глухих отверстий. Конструкция и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

6. Расточной резец: пат. BY 13247 / А. А. Жолобов, О. Н. Кляус, К. А. Илбовников. – Опубл. 30.08.2023.

7. Каталог SANDVIK COROMANT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sandvik.coromant.com.ru. – Дата доступа: 19.01.2023.

8. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., испр. – Москва: Машиностроение-1, 2003. – Т. 2. – 946 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 19 декабря 2023 года

Контакты:
bru_AA@mail.ru (Жолобов Александр Алексеевич);
klyaus.olya@yandex.by (Кляус Ольга Николаевна);
ilbovnikov86@mail.ru (Илбовников Кирилл Анатольевич).

A. A. ZHOLOBOV*, *O. N. KLIAUS*, *K. A. ILBOVNIKOV

ON IMPROVING DESIGNS OF BORING CUTTERS

Abstract

Boring cutters of more rigid designs have been created by developing transition zones and improving the geometry of a conical part of the boring tool by simulating the elastic displacement in various boring cutter designs during hole formation. A new shape of a toolholder with a toroidal disk and a barrel-shaped conical part has been proposed, which increases resistance to cutting forces. The optimal geometric shapes and parameters of boring cutters with the least elastic displacement during hole formation have been determined.

Keywords:

boring cutter rigidity, boring cutter designs, elastic displacement, transition zone.

For citation:

Zholobov, A. A. On improving designs of boring cutters / A. A. Zholobov, O. N. Kliaus, K. A. Ilbovnikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 14–24.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-25-34

УДК 621.791.763.2

А. О. КОРОТЕЕВ, *канд. техн. наук*, *доц.*
Е. А. ФЕТИСОВА
А. А. КОРОТЕЕВА
А. А. ЛОПАТИНА
В. Д. ДОЛГАЯ
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ГАЛОГЕНИДНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ SF_6 ($Ar + CO_2 + SF_6$)

Аннотация

Определены зависимости частоты коротких замыканий дугового промежутка при наплавке в защитной газовой среде $Ar + CO_2 + SF_6$. На основании полученных экспериментальных данных определены области наиболее стабильного протекания процесса переноса электродного металла в условиях модификации защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 с точки зрения частоты коротких замыканий дугового промежутка. Эксперименты проведены в диапазоне значений силы тока, соответствующих докритическим и не приводящим к струйному характеру переноса электродного металла. Зафиксирован эффект кратковременного струйного переноса электродного металла при разрыве жидкой перемычки при наплавке с использованием повышенных напряжений на дуге и введении SF_6 в защитную газовую среду.

Ключевые слова:

дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, гексафторид серы, напряжение на дуге, частота коротких замыканий, перенос электродного металла, модификация защитной газовой атмосферы.

Для цитирования:

Особенности переноса электродного металла при дуговой сварке и наплавке с модификацией защитной газовой атмосферы галогенидным соединением SF_6 ($Ar + CO_2 + SF_6$) / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, А. А. Коротеева, А. А. Лопатина, В. Д. Долгая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 25–34.

Введение

Дуговая сварка в защитных газовых смесях является наиболее динамично развивающимся способом, активно применяемым в промышленности для решения задач создания неразъемных соединений в условиях требований импортозамещения, высокой производительности и широких возможностей для механизации и роботизации. В ряде работ, опубликованных ранее [1–7], отмечено, что современные материалы, стали и сплавы требуют применения для защиты зоны горения дуги инертных газов и смесей на их основе (более 80 % составляет инертный газ). Следует сказать, что общая тенденция развития сварочных материалов все более ориентирована на использование сложных систем легирования и упрочнения, зачастую легирующие элементы вводятся в количествах, сопоставимых с пределом растворимости в твердом растворе, что позволяет обеспечить наибольшую эффективность для получения требуемых характеристик материала. С точки зрения сварки, наличие большого количества легирующих элементов, содержание каждого из которых невелико и может не превышать 1 %, создает трудности, т. к. воздействие термического цикла и взаимодействие расплавленного металла в дуговом проме-

© Коротеев А. О., Фетисова Е. А., Коротеева А. А., Лопатина А. А., Долгая В. Д., 2024

жутке с защитной газовой средой в «сильно перегретом» состоянии на стадии капли неизбежно приводит к потерям этих элементов. Спрогнозировать химический состав получаемого наплавленного металла с учетом большого количества факторов чрезвычайно сложно. В связи с этим наиболее предпочтительны инертные газы как среда, практически не взаимодействующая с расплавленным металлом, что позволяет «условно» обеспечить постоянство его химического состава при переходе через дуговой промежуток за вычетом потерь на испарение в области высоких температур.

На сегодняшний день защитные газовые среды на основе инертных газов вытесняют сварку в среде CO_2 практически по всем показателям. Значительно меньшие потери на разбрызгивание электродного металла, высокие показатели механических характеристик, ударной вязкости и пластичности наплавленного металла и, что более существенно, возможность эффективной сварки материалов, о которых сказано выше. Вместе с тем переход на использование таких защитных газовых сред существенно повышает требования к подготовке деталей под сварку и зачистке промежуточных слоев сварного соединения. Инертная газовая среда не позволяет управлять металлургическими процессами в дуговом промежутке что может приводить к появлению серьезных дефектов в виде несплавлений. Опасным в этих условиях является наличие в защитной газовой атмосфере водорода, являющегося продуктом диссоциации адсорбированной влаги, продуктом высокотемпературного разложения следов коррозии и загрязнений на кромках деталей и др.

В ряде работ [1–7] рассматривается перспективное направление модификации защитной газовой атмосферы галогенидным газообразным соединением SF_6. Фторсодержащие компоненты широко применяются в производстве флюсов и электродных покрытий и их эффективность в борьбе с водородом достаточно хорошо известна. В то же время рассматриваемый способ сварки основан на применении проволок сплошного сечения и инертной газовой среды. В таких условиях наиболее эффективным представляется введение SF_6 непосредственно в струю защитного газа через сопло сварочной горелки. Особенности и преимущества такого способа с точки зрения снижения количества диффузионного водорода в наплавленном металле шва и технические особенности реализации были описаны ранее [5, 6]. В статье рассмотрены особенности модификации защитной атмосферы с точки зрения стабилизации процесса и анализа частоты коротких замыканий дугового промежутка.

Основная часть

Перенос электродного металла является одним из наиболее важных технологических параметров процессов сварки и наплавки. Наиболее предпочтительными видами по ряду параметров являются перенос короткими замыканиями дугового промежутка и так называемый струйный. Первый характеризуется относительно невысокими, для конкретного типа и диаметра сварочной проволоки, так называемыми докритическими значениями силы тока, что, вследствие невысокой скорости ее плавления, приводит к сближению капли присадочного электродного металла с поверхностью расплавленной ванны и замыканию дугового промежутка. Короткое замыкание сопровождается резким ростом силы тока, перегревом перемычки жидкого металла между каплей и поверхностью ванны, разрывом этой перемычки вследствие вскипания и действия сжимающих сил, обусловленных магнитным полем. Процесс возобновляется, а капля за счет силы поверхностного натяжения переходит в сварочную ванну. Механизм воздействия

конкретных сил и факторов на сегодняшний день относительно хорошо исследован. Резкий скачок значения силы тока в момент короткого замыкания является наиболее характерным признаком при анализе осциллограмм процесса. Кроме того, процесс благодаря этому хорошо контролируется и большинство существующих на сегодняшний день систем управления переносом электродного металла основаны именно на этом эффекте и используют диапазон значений режимов, обуславливающий тип переноса короткими замыканиями.

Струйный характер переноса электродного металла возникает при значениях силы тока, превышающих критические. При этом складывается ряд условий, при которых равнодействующая сил, действующих на каплю жидкого металла, направлена в сторону сварочной ванны, что приводит к ее вытягиванию и дроблению на мелкие капли, неразличимые и представляющие собой сплошной канал. Процесс стабилен и практически лишен потерь на разбрызгивание электродного металла. Вместе с тем следует отметить, что для достижения такого эффекта требуется использование достаточно высоких значений силы тока, что в ряде случаев может приводить к перегреву свариваемых деталей вследствие большого тепловложения. Высокое давление на сварочную ванну приводит к резкому росту глубины проплавления по оси шва. Повышается вероятность возникновения дефектов типа несплавлений вследствие большого объема расплавленного металла, стремительно заполняющего разделку кромок при сварке. Это делает область существования струйного характера переноса эффективной, но узко применимой на практике, особенно в случаях сварки материалов, чувствительных к термическому циклу.

Капельный перенос, при котором отдельные капли расплавленного металла отделяются от торца плавящейся проволоки и перемещаются свободно через дуговой промежуток, является нежелательным. Процесс сложно контролируем, т. к. момент отделения капли от проволоки достаточно сложно зафиксировать.

Введение галогенидного модификатора SF_6 в состав защитной газовой атмосферы оказывает существенное влияние на характеристики дугового разряда, процессы плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла в расплавленную ванну. Это обусловлено в первую очередь высоким потенциалом ионизации фтора, как продукта высокотемпературной реакции диссоциации SF_6.

Для оценки значения частоты переноса электродного металла использовалась методика, основанная на анализе осциллограмм с совмещенной скоростной видеосъемкой при наплавке одиночных валиков на пластину. Это позволяет не только зафиксировать моменты короткого замыкания дугового промежутка, но и визуально оценить характер формирования капли расплавленного металла на торце проволоки и ее поведение до перехода в сварочную ванну. Внешний вид установки представлен на рис. 1.

В качестве регистратора сварочных процессов использовался регистратор РКДП-0401. Количество вводимого SF_6 изменялось от 0 % до 2 % в соответствии с проведенными ранее исследованиями [6, 7]. Для получения защитной газовой смеси требуемого состава использовалась разработанная установка для смешивания компонентов, описанная ранее [7]. Важным вопросом при этом является точное соотношение компонентов, т. к. количество вводимого SF_6 в состав защитной смеси невелико и штатные газовые трехкомпонентные смесители не позволяют это эффективно осуществить. Режимы наплавки задавались без использования синергетических программ управления значениями параметров и задавались через скорость подачи присадочной проволо-

ки $V_{п.пр.}$ и напряжение на дуге $U_д$. Было установлено, что в условиях постоянства скорости подачи именно напряжение на дуге позволяет эффективно влиять на энергетические характеристики дугового разряда, изменять длину дуги, оказав тем самым влияние на ход протекания металлургических реакций взаимодействия жидкого расплавленного металла перегретой капли с омывающим потоком защитной газовой смеси и продуктом высокотемпературных реакций ее компонентов.

В экспериментах использовалось четыре варианта скорости подачи присадочной проволоки: 2,3; 3,7; 5,3 и 7,7 м/мин. Первые три значения соответствуют области стабильного существования переноса электродного металла короткими замыканиями. Значение силы сварочного тока находится в диапазоне 100…200 А. Следует отметить, что это наиболее широко используемая на практике область значений, характеризуемая оптимальным соотношением мощности тепловложения, характеристик проплавления основного металла, стабильности процесса и минимизации потерь на разбрызгивание (рис. 2). Результаты анализа осциллограмм представлены на рис. 3 и 4 и в табл. 1.

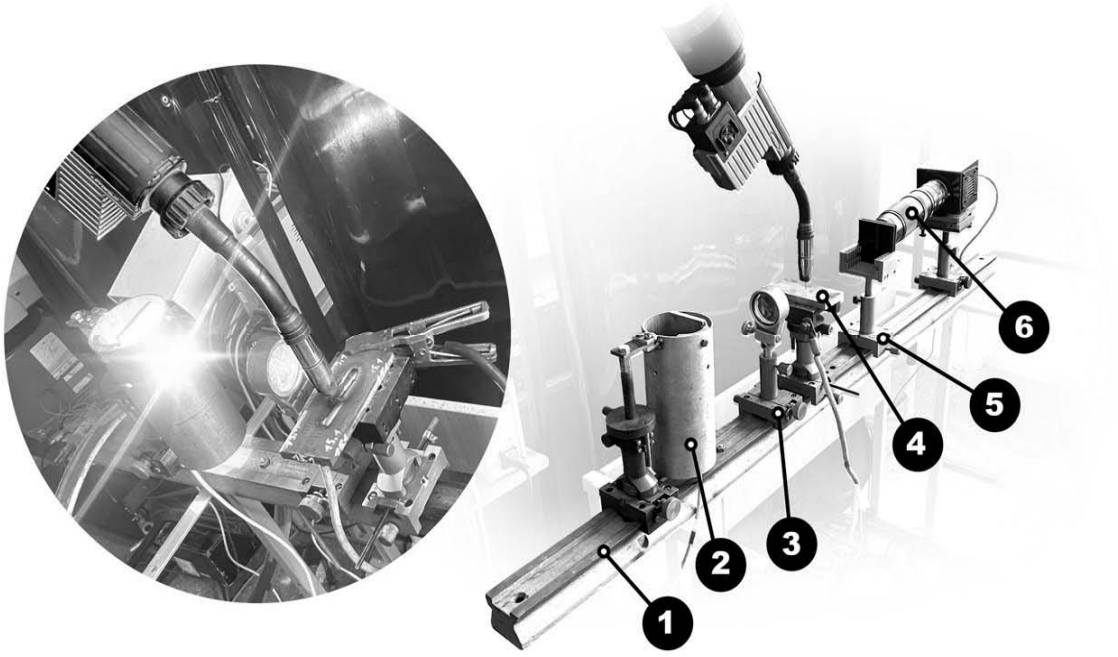


Рис 1. Внешний вид установки для скоростной видеосъемки процесса переноса электродного металла: 1 – направляющая; 2 – система подсветки с лампой; 3 – линза; 4 – стол с образцом для наплавки; 5 – система светофильтров; 6 – камера

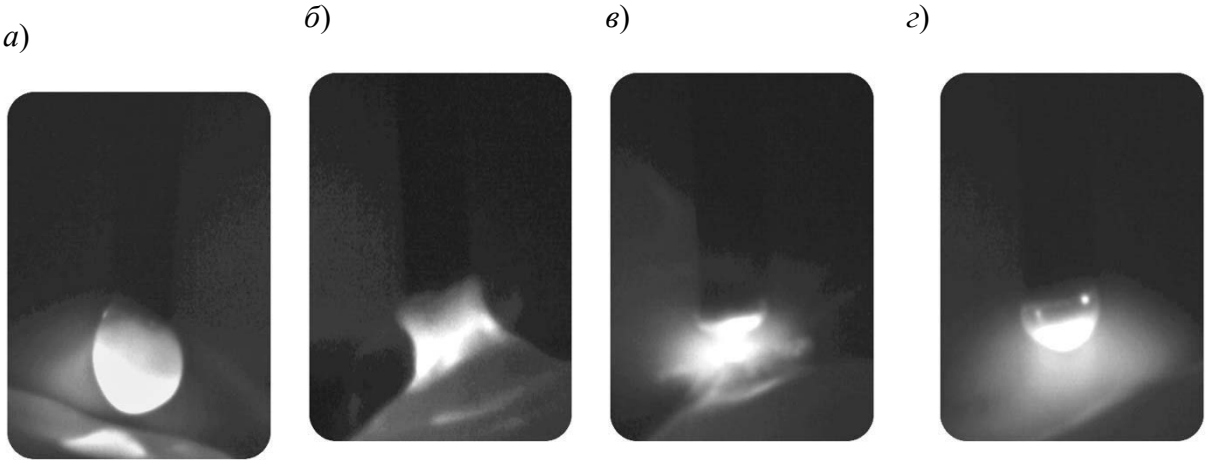


Рис. 2. Стадии переноса электродного металла: *а* – стадия формирования капли; *б* – короткое замыкание дугового промежутка; *в* – разрыв перемычки жидкого металла (возобновление горения дуги); *г* – стадия формирования капли

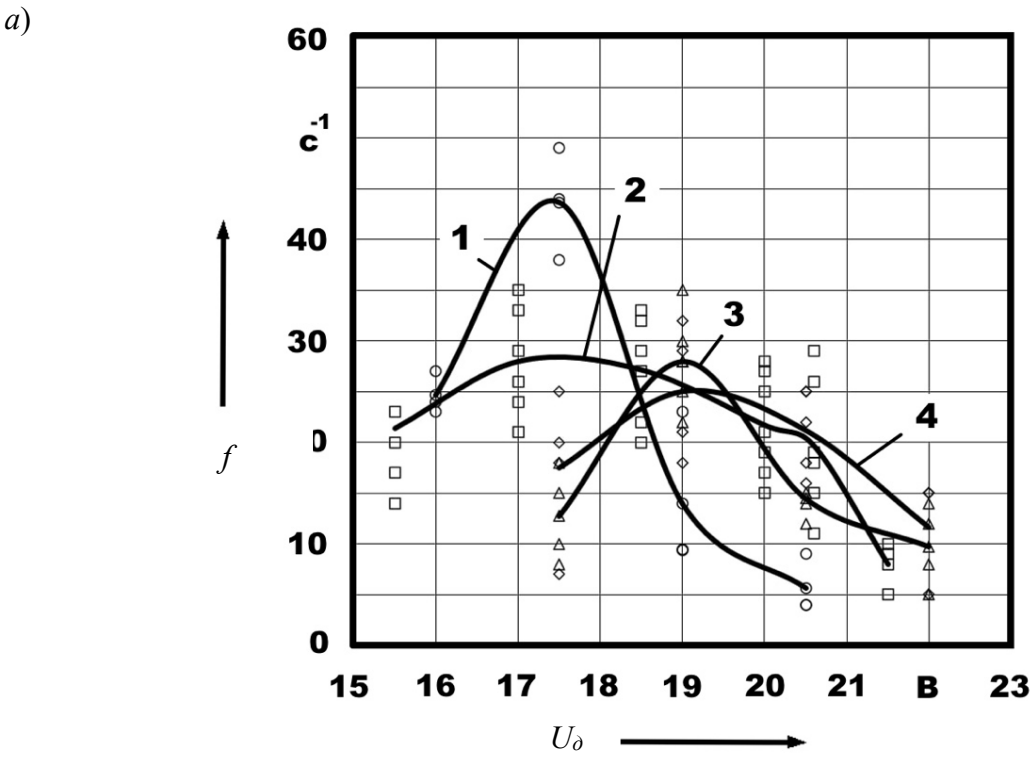
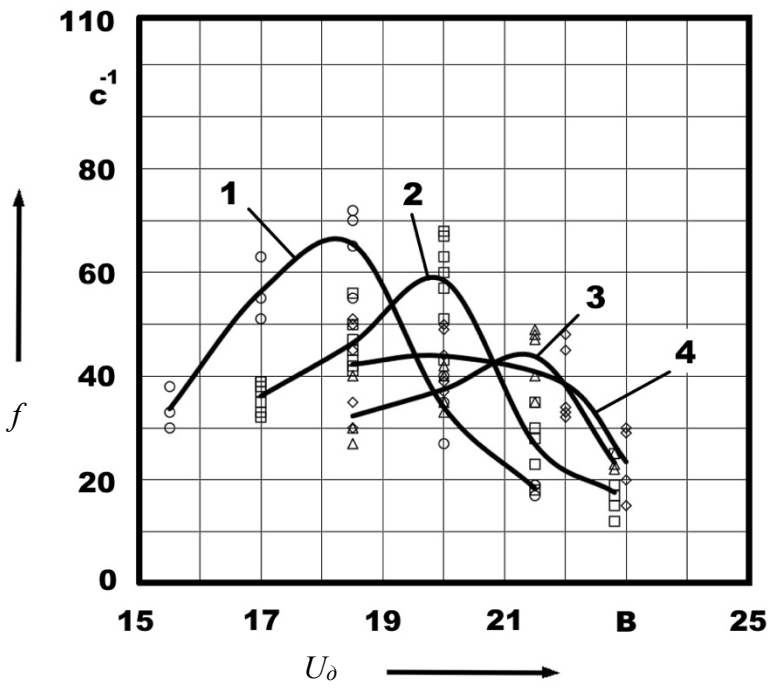


Рис. 3. Зависимость значения частоты коротких замыканий дугового промежутка f от напряжения на дуге $U_д$ при различном значении количества вводимого SF_6 в защитную атмосферу и скорости подачи присадочной проволоки: *а* – $V_{п.пр.}$ = 2,3 м/мин; *б* – $V_{п.пр.}$ = 3,7 м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2; 2 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6; 3 – (Ar + CO_2) + 1 % SF_6; 4 – (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

б)



Окончание рис. 3

а)

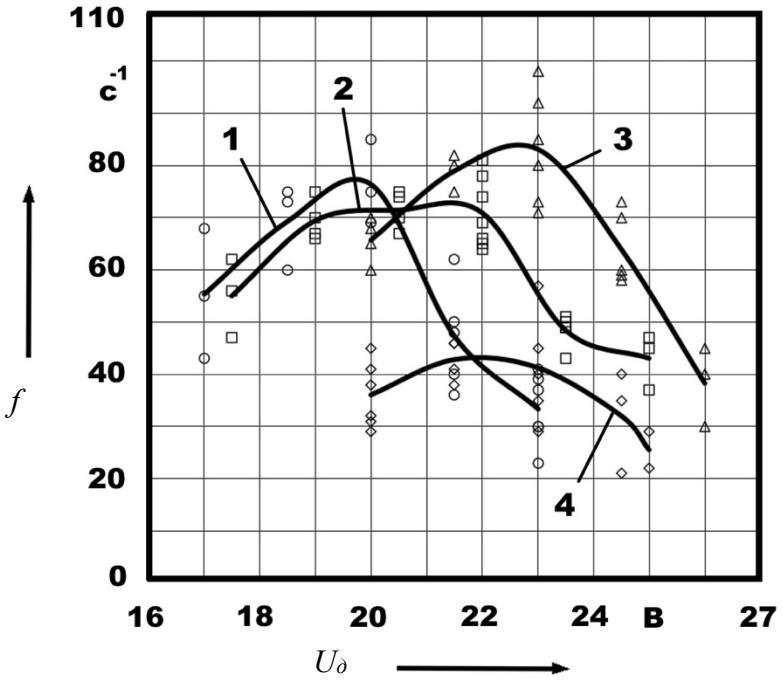
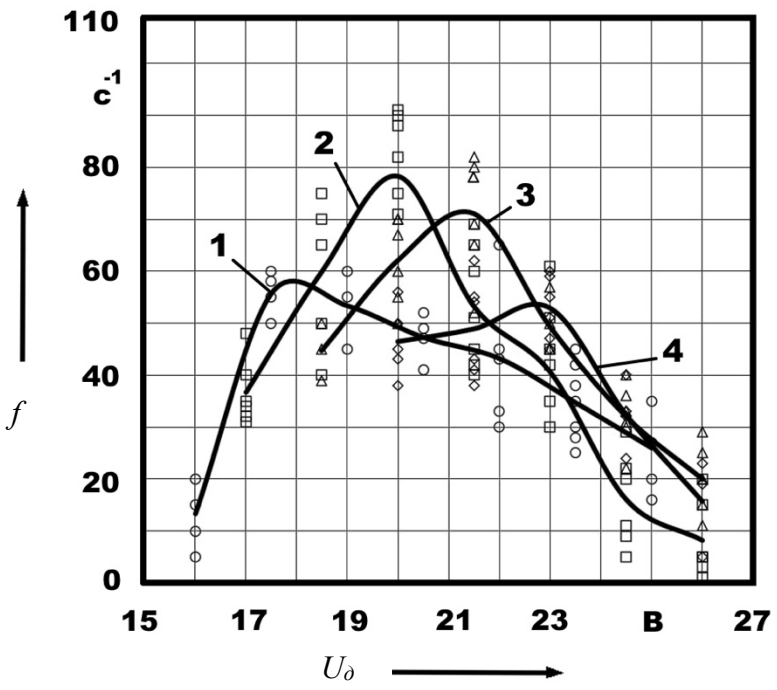


Рис. 4. Зависимость значения частоты коротких замыканий дугового промежутка f от напряжения на дуге $U_д$ при различном значении скорости подачи присадочной проволоки и количества вводимого SF_6 в защитную атмосферу: *а* – $V_{п.пр.}$ = 5,3 м/мин; *б* – $V_{п.пр.}$ = 7,7 м/мин; 1 – наплавка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2; 2 – (Ar + CO_2) + 0,5 % SF_6; 3 – (Ar + CO_2) + 1 % SF_6; 4 – (Ar + CO_2) + 2 % SF_6

б)



Окончание рис. 4

Табл. 1. Значения частоты коротких замыканий дугового промежутка коэффициента потерь электродного металла при различных соотношениях значений параметров режима и количества вводимого SF_6 в состав защитной газовой атмосферы

Скорость подачи присадочной проволоки, м/мин	Ориентировочное значение силы тока, А	Номер кривой на графических зависимостях (см. рис. 3 и 4)	Количество вводимого SF_6, %	Наиболее эффективное значение напряжения на дуге $U_д$, В	Значение частоты коротких замыканий, $с^{-1}$
2,3	98...103	1	0	17,5	44
		2	0,5	18,0	29
		3	1	19,0	28
		4	2	20,0	25
3,7	147...155	1	0	18,5	67
		2	0,5	20,0	60
		3	1	21,5	44
		4	2	21,0	43
5,3	195...202	1	0	19,8	78
		2	0,5	22,0	72
		3	1	23,0	84
		4	2	23,0	43
7,7	246...254	1	0	17,5	59
		2	0,5	20,0	79
		3	1	21,6	71
		4	2	23,0	52

Повышение скорости подачи присадочной проволоки до 7,7 м/мин, что соответствует силе тока 246…254 А, приводит к некоторой нестабильности процесса в силу близости значений к «критическому» для перехода процесса в струйный характер переноса электродного металла. При этом в случае скачков значений параметров вследствие возмущений и посторонних факторов возможно кратковременное изменение характера переноса, особенно в диапазоне наибольших, применяемых при проведении экспериментов, значений напряжения на дуге. Этот эффект замечен ранее и позволяет получать струйный перенос металла на докритических токах путем сильного повышения напряжения относительно оптимального значения [7, 8]. Вместе с тем режим является нестабильным и в таком виде не рассматривается в рамках данной публикации.

Повышение скорости подачи свыше 7,7 м/мин приводит к полному переходу в область струйного переноса электродного металла, и оценка частоты коротких замыканий по естественным причинам становится неактуальна для этой области.

Анализ полученных результатов показал, что на всех графиках (см. рис. 4) имеется максимум, соответствующий наиболее стабильному протеканию процесса. На относительно малых значениях силы тока, соответствующих скорости подачи присадочной проволоки 2,3 м/мин, введение SF_6 снижает частоту коротких замыканий, что объясняется снижением мощности дугового разряда из-за так называемого дугоподавляющего свойства SF_6, обусловленного высоким потенциалом ионизации фтора. Малая мощность и невысокие значения силы тока в этом случае приводят к нестабильности процесса.

Однако можно отметить, что на значениях скорости подачи 3,7 м/мин и выше этот эффект уже не столь заметен и в некоторых случаях (при скорости подачи 5,3 и 7,7 м/мин) даже позволяет повысить частоту переноса электродного металла. Объяснением этого может быть принципиальное изменение условий существования дугового промежутка.

В целом можно отметить, что повышение содержание SF_6 в защитной атмосфере вызывает необходимость повышения напряжения. Полученные данные хорошо согласуются с опубликованными ранее результатами анализа коэффициента потерь [7].

При проведении экспериментов и анализе скоростной видеосъемки установлено, что момент разрыва перемычки и возобновления процесса горения дуги на режиме, соответствующем скорости подачи присадочной проволоки 7,7 м/мин, может сопровождаться кратковременным эффектом струйного переноса электродного металла (рис. 5). По-видимому, это происходит вследствие большого количества паров металла, образующихся вследствие вскипания перегретого металла. Пары кратковременно значительно снижают эффективный потенциал ионизации в этой области, что в условиях сильно повышенного напряжения, необходимого для компенсации высокого потенциала ионизации продуктов диссоциации SF_6, способствует переходу в струйный режим. Впоследствии режим стабилизируется, состав атмосферы дугового промежутка меняется и процесс вновь переходит в фазу стадии коротких замыканий.

Данный эффект представляет повышенный интерес с точки зрения возможностей управления процессами переноса электродного металла при сварке и наплавке, т. к. ярко демонстрирует чувствительность дугового разряда к градиенту химического состава функциональных защитных газовых сред. Работы в данном направлении продолжают нами проводиться.

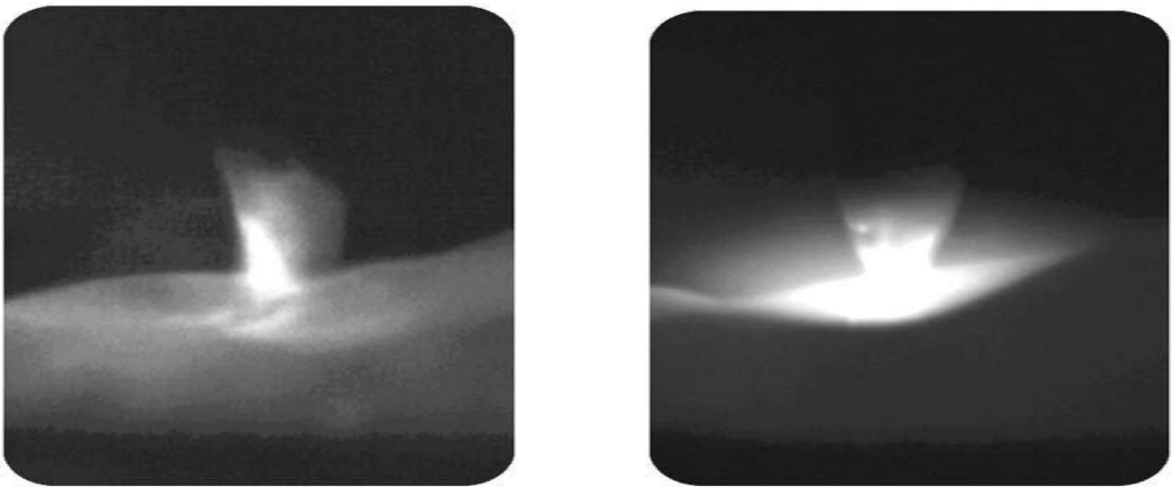


Рис. 5. Кратковременное возникновение струйного переноса при разрыве перемычки жидкого металла

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

1. Введение SF_6 в состав защитной газовой среды Ar + CO_2 в количестве до 2 % при использовании скоростей подачи присадочной проволоки в диапазоне значений 2,3…7,7 м/мин (сила тока 98…254 А) оказывает существенное влияние на частоту коротких замыканий при переносе электродного металла. На малых значениях скорости подачи (до 3,7 м/мин) частота уменьшается с повышением количества SF_6. Однако повышение напряжения позволяет не только оставить ее на прежнем уровне, стабилизировав процесс, но и, начиная со скоростей подачи 5,3 м/мин (сила тока 195 А) и выше, повысить частоту. Причем чем выше значение скорости подачи, тем эффект от влияния количества SF_6 проявляется сильнее. При скорости подачи 7,7 м/мин введение в защитную среду 82 % Ar + 18 % CO_2 до 0,5 %…1 % SF_6 позволяет повысить частоту коротких замыканий на 20 % по сравнению с технологией в среде Ar + CO_2.

2. Стабилизация процесса на существенно больших (в среднем на 2 В за каждые введенные 0,5 % SF_6) значениях напряжения на дуге изменяет характер ее горения и переноса электродного металла. В случае использования скоростей подачи присадочной проволоки 7,7 м/мин (сила тока 246…254 А) при разрыве перемычки жидкого металла возникает кратковременное явление струйного переноса. Это, по-видимому, обусловлено появлением проводящего канала с низким потенциалом ионизации из-за концентрации паров металла в области разрыва перегретой перемычки. Более высокое напряжение способствует переходу в струйный характер переноса на докритических токах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фетисова, Е. А.** Технология дуговой сварки с введением модифицирующих газовых компонентов в защитную атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 175–178.

2. **Фетисова, Е. А.** Перспективы применения галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // I Респ. форум молодых ученых учреждений высш. образования: сб. материалов форума. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 75–76.

3. **Фетисова, Е. А.** Особенности дуговой сварки и наплавки с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всерос. нац. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апр. 2022 г. – Комсомольск-на-Амуре: КнаГУ, 2022. – С. 89–90.

4. **Коротеев, А. О.** Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 112–118.

5. **Фетисова, Е. А.** Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 174.

6. **Фетисова, Е. А.** Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

7. О потерях электродного металла при дуговой сварке с модификацией защитной атмосферы газообразными галогенидными соединениями / Е. А. Фетисова [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 97–106.

8. Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси Ar + CO_2 / А. О. Коротеев [и др.] // Наука и техника. – 2023. – № 22 (4). – С. 269–277.

Статья сдана в редакцию 5 февраля 2024 года

Контакты:
karatseyeu_artur@fastmail.com (Коротеев Артур Олегович);
fetisova9891@gmail.com (Фетисова Екатерина Анатольевна);
astainside@gmail.com (Коротеева Александра Александровна);
arina.lopatina.2003@mail.ru (Лопатина Арина Алексеевна);
veronikadolgaa477@gmail.com (Долгая Вероника Дмитриевна).

A. O. KARATSEYEU*, *E. A. FIATSISAVA*, *A. A. KARATSEYEVA*, *A. A. LAPATSINA*, *V. D. DOUHAYA

FEATURES OF ELECTRODE METAL TRANSFER DURING ARC WELDING AND SURFACING WITH MODIFICATION OF PROTECTIVE GAS ATMOSPHERE BY SF_6 HALIDE COMPOUND (Ar + CO_2 + SF_6)

Abstract

Dependencies of the frequency of short circuits across the arc gap during surfacing in Ar + CO_2 + SF_6 protective gas atmosphere have been determined. Based on the experimental data obtained, areas of the most stable process of electrode metal transfer in the protective gas atmosphere modified by SF_6 halide compound have been found from the viewpoint of the frequency of short-circuiting of the arc gap. The experiments have been carried out in the range of current values corresponding to subcritical and not leading to the jet nature of electrode metal transfer. The effect of short-term jet transfer of electrode metal has been recorded upon the rupture of a liquid bridge during surfacing by using increased arc voltages and introducing SF_6 into a protective gas medium.

Keywords:

gas-shielded arc welding, shielding gas mixtures, sulfur hexafluoride, arc voltage, short circuit frequency, electrode metal transfer, modification of shielding gas atmosphere.

For citation:

Features of electrode metal transfer during arc welding and surfacing with modification of protective gas atmosphere by SF_6 halide compound (Ar + CO_2 + SF_6) / A. O. Karatseyeu, E. A. Fiatsisava, A. A. Karatseyeva, A. A. Lapatsina, V. D. Douhaya // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 25–34.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-35-45

УДК 621.746.6:542.65

Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ[1], *канд. физ.-мат. наук*
А. М. БРАНОВИЦКИЙ[2], *канд. техн. наук*
[1]Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)
[2]Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА КРИСТАЛЛОВ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ АНИЗОТРОПИИ В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Аннотация

Реализован алгоритм моделирования роста кристаллов методом фазового поля с регуляризацией функции анизотропии поверхностного натяжения для двумерного случая. Расчеты сделаны для случая роста кристаллов кремния при сильном переохлаждении и для роста из расплава заэвтектических силуминов. Рассчитаны морфологии роста кристаллов в среде с флуктуирующей температурной зависимостью от уровня пространственных и временных флуктуаций для различной степени анизотропии. Рассчитано изменение морфологии для случая изменения анизотропии от четырехугольной к гексагональной симметрии во время роста. Оценено влияние сильной анизотропии для случая роста кристаллов в движущемся расплаве.

Ключевые слова:

гранные кристаллы, микроструктура, метод фазового поля, моделирование, морфология первичных кристаллов.

Для цитирования:

Лебединский, Ю. А. Моделирование роста кристаллов с высокой степенью анизотропии в изменяющихся условиях кристаллизации / Ю. А. Лебединский, А. М. Брановицкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 35–45.

Введение

Для кристаллизации металлов из расплава характерен так называемый «рыхлый» режим, когда атом из расплава может присоединиться к любому месту на поверхности кристалла. Иная ситуация наблюдается при кристаллизации неметаллов, например кремния. Атом или группа атомов могут присоединиться только к растущему на границе кристалла слою, заняв «ступеньку» между растущим слоем и предыдущим. При таком характере роста получаемые кристаллы имеют четко выраженные грани, что и обусловило их название faceted (или facetted) crystals – гранные кристаллы, в отличие от unfaceted кристаллов металлов.

Один из способов моделирования роста гранных кристаллов основан на использовании высоких значений показателя анизотропии поверхностного натяжения при расчетах методом фазового поля. Если для металлов характерными значениями анизотропии являются 2 %...3 %, то, например, для кристаллов кремния с кубической решеткой это значение равно 17 %. Под кривой поверхностью температура плавления вещества уменьшается – эффект Гиббса – Томсона. Но в некоторых направлениях для высокой анизотропии произойдет повышение температуры плавления, что противоречит принципам термодинамики. Чтобы избежать этого, моделирование роста кристаллов методом фазового поля осуществляется с учетом коррекции поведения функции анизотропии. На направлениях, где могло бы оказаться повышение температуры плавления, функция анизотропии заменяется на выражения, обеспечивающие соблюдение эффекта Гиббса – Томсона. Такая

© Лебединский Ю. А., Брановицкий А. М., 2024

процедура называется регуляризацией уравнений фазового поля [1–6].

При этом для корректно подобранных выражений для замены функции анизотропии оказывается, что такой кристалл не имеет участков поверхности, где угол между нормалью к поверхности и главными осями кристалла лежит в области повышения температуры плавления, описанной ранее. На «изломе» граней имеется просто резкий скачок направления нормали к поверхности.

Однако такой скачок имел бы место только при точном решении уравнений фазового поля с шагом, стремящимся к нулю. На практике ввиду конечности шага и неточностей аппроксимации производных от нормали по координатам (особенно вторых производных даже при их оптимальном подборе) вблизи излома у численно моделируемого кристалла имеются небольшие участки поверхности с «запрещенными» направлениями нормалей.

На основе подобных алгоритмов может моделироваться как рост кристаллов из расплава одного вещества, так и рост первичных кристаллов из расплава смеси двух компонентов. В первом случае рост кристаллов контролируется диффузией тепла. В такой ситуации рост кристаллов сильно зависит от геометрии системы и определяется в основном расположением глобальных мест стока тепла из затвердевающей системы. Вне экспериментов по направленному затвердеванию морфологию таких кристаллов трудно сравнивать с реальной.

В бинарных сплавах рост первичных кристаллов контролируется обычно скоростью диффузии второго компонента (примеси), которая имеет локальный характер. Это позволяет оценивать получаемую морфологию вне зависимости от глобальных граничных условий.

В отличие от металлических кристаллов для многих гранных кристаллов характерно изменение параметров кристаллизации при изменении переохлаждения. Значительные изменения формы и степени анизотропии поверхностной энергии при различных переохлаждениях приводят к многообразию форм таких кристаллов. Достаточно упомянуть многообразие морфологии кристаллов кремния в эвтектических силуминах. Данная работа во многом посвящена изменению морфологии кристаллов при изменении переохлаждения как в температурных полях со значительными случайными флуктуациями, так и для случаев детерминированных изменений. При этом симметрия функции анизотропии может меняться с четырехугольной на шестиугольную (и наоборот) или на восьмиугольную. Также произведены расчеты для случая роста кристаллов с различной степенью анизотропии в условиях перемешивания.

Одним из уравнений роста кристаллов является уравнение Гиббса – Томсона, определяющее переохлаждение вблизи кривой поверхности, необходимое для затвердевания жидкой фазы. Данное переохлаждение зависит от второй производной по углам между нормалью к поверхности и осями координат. В литературе предложен ряд аппроксимаций для описания таких разрывных функций.

Численный метод фазового поля для расчета роста кристаллов фактически является единственным методом, позволяющим корректно описывать морфологическую эволюцию кристаллов. Но в данном случае метод сталкивается с рядом дополнительных трудностей, поскольку любая его формулировка содержит первые и вторые производные зависимости поверхностной энергии от направления нормали.

Метод фазового поля предполагает «размытие» резкой границы между фазами. В такой промежуточной зоне начинается диффузия атомов, зависящая от вида аппроксимации анизотропии, что создает дополнительные сложности и может приводить к некорректному

поведению решений при стремлении переходной зоны к нулю [1].

В настоящее время существует ряд попыток замены функции анизотропии со скачкообразным поведением на плавные функции с наличием вторых производных по направлениям в каждой точке. Такая процедура получила название регуляризации уравнений фазового поля в части описания поверхностной энергии [2–5].

Наибольшее распространение для решения прикладных задач получил метод [2, 6], основанный на замене вогнутой фигуры зависимости поверхностной энергии от направления нормали на выпуклую. Он показывает высокую эффективность при численных расчетах. Данный метод основан на регуляризации параметров, отвечающих за пространственную анизотропию поверхностного натяжения, характерную для гранного кристалла.

В численных моделях роста кристаллов используется уравнение Гиббса – Томсона, определяющее изменение температуры затвердевания перед кривой поверхностью. Для двумерного случая поверхности с кривизной K такое изменение пропорционально $\left(\gamma+\frac{\partial^2\gamma}{\partial\theta^2}\right)K$, где $\gamma(\theta)$ – зависимость поверхностной энергии от угла θ между нормалью и обычно осью OX.

Для описания анизотропии для кубической решетки в двумерном случае используется зависимость

$$\gamma=\gamma_0\left(1+\varepsilon_4\cos 4\theta\right), \qquad (1)$$

где ε_4 – параметр анизотропии.

Одним из методов представления анизотропии служит конструкция Вульфа – форма, при которой кристалл заданного объема обладает минимальной поверхностной энергией. Для малой анизотропии такая поверхность гладкая и выпуклая. Приближенно ее можно рассматривать как круг (шар в трехмерном случае), поскольку шар имеет минимальную площадь поверхности при заданном объеме.

При увеличении анизотропии ряд ориентаций поверхности не может быть реализован и имеются разрывы в возможных направлениях нормали к поверхности. С увеличением анизотропии форма поверхности стремится к квадрату (кубу в трехмерном случае), т. е. имеем фактически только несколько возможных ориентаций поверхности. Это связано с тем, что все другие ориентации имеют значительно большую поверхностную энергию.

Пропадающие из конструкции Вульфа ориентации лежат в диапазоне, когда в угловой диаграмме $\frac{1}{\gamma}$ имеются вогнутые участки. Это имеет место для случая, при котором переохлаждение равно нулю:

$$\gamma+\frac{\partial^2\gamma}{\partial\theta^2}=1-15\varepsilon_4\cos 4\theta=0. \qquad (2)$$

В методе фазового поля используется параметр ε, определяющий вклад поверхностной энергии в общую энергию системы. Он описывает вклад в общую свободную энергию системы за счет изменения фазовой переменной – аналог граничной энергии, но для границы, «растянутой» на некоторую конечную величину.

Как правило, вид его анизотропии совпадает с вышеприведенной формой для поверхностной энергии в уравнении Гиббса – Томсона:

$$\varepsilon(\theta)=\varepsilon_0\left(1+\varepsilon_4\cos 4\theta\right). \qquad (3)$$

При этом на углах $\theta<\theta_m$ при большой анизотропии в диаграмме $1/\varepsilon$ имеются вогнутые участки. Угол θ_m определяется из соотношения

$$\varepsilon(\theta_m)\sin\theta_m + \frac{\partial\varepsilon}{\partial\theta}\cos\theta_m = 0. \quad (4)$$

Численное решение в этой области неустойчиво и имеет тенденцию быстро расходиться. Для регуляризации был использован метод модификации параметра ε, обеспечивающий выпуклую форму $1/\varepsilon$. Модифицированный параметр $\tilde{\varepsilon}$ в первом квадранте имеет вид

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{cases} \varepsilon(\theta) & \text{при } \theta_m \le |\theta| \le \pi/4; \\ \dfrac{\varepsilon(\theta_m)\cos\theta}{\cos(\theta_m)} & \text{при } |\theta| < \theta_m, \end{cases} \quad (5)$$

что соответствует замене вогнутого участка на выпуклый – на часть дуги окружности.

Аналогичные построения производятся для случая, когда исходная симметрия кристалла – гексагональная:

$$\varepsilon(\theta) = \varepsilon_0\left(1 + \varepsilon_6\cos 6\theta\right). \quad (6)$$

Вид регуляризованных уравнений фазового поля

В уравнения фазового поля входит угол φ, аналогичный углу θ между нормалью и осью *X*. В случае замены линии границы фаз на полосу конечной толщины W угол φ определяется как угол между градиентом фазовой функции ϕ и осью *X*:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\Big/\frac{\partial\phi}{\partial x}\right). \quad (7)$$

При этом регуляризованное значение параметра толщины межфазного слоя представлено в [6].

При таком выборе функции анизотропии поверхностного натяжения уравнения фазового поля для случая затвердевания одного вещества имеют вид, различающийся в зависимости от угла φ. Для случая, когда угол φ не лежит в области регуляризированных значений, $\frac{\pi}{2}i + \varphi_m \le \varphi \le \frac{\pi}{2}(i+1) - \varphi_m$, $i = 0...3$, имеем известное уравнение для эволюции фазового поля ϕ во времени t [7]

$$\tau(\varphi)\frac{\partial\phi}{\partial t} = \nabla\cdot(W(n)^2\nabla\phi) - \partial_x\left[W(n)W_\varphi(n)\partial_y\phi\right] +$$

$$+\ \partial_y\left[W(n)W_\varphi(n)\partial_x\phi\right] + \phi - \phi^3 - \lambda\theta\phi\left(1-\phi^2\right)^2.$$

Здесь n – единичный вектор нормали к линии уровня ϕ, $n = \nabla\phi/|\nabla\phi|$; ∂_x, ∂_y – частные производные по координатам; $W_\varphi = \frac{\partial W}{\partial\varphi}$. Аналогично поверхностной энергии время релаксации $\tau = \tau_0\left(1+\varepsilon_4\cos(4\varphi)\right)$. Параметр «связи» λ может быть в достаточной степени произвольным и служит для проверки точности конкретной численной схемы.

Значение φ_m находится из условия $W(\varphi_m)\sin\varphi_m + \frac{\partial W}{\partial\varphi}\cos\varphi_m = 0$, а зависимость W от угла моделирует симметрию с поворотом на $\frac{\pi}{2}$, $W = W_0\left(1+\varepsilon_4\cos(4\varphi)\right)$.

Значение безразмерного переохлаждения

$$\theta = \frac{T - T_m}{L/c_p},$$

где T – текущая температура; T_m – температура плавления; L – теплота плавления; c_p – теплоемкость при постоянном давлении. Оно может как задаваться, например, в изотермическом приближении, так и рассчитываться на основе уравнения теплопереноса.

Для случаев замены функции анизотропии на регуляризованные выражения уравнение для фазового поля значительно упрощается вследствие такого их выбора:

– для углов $\left(\frac{\pi}{2}i - \varphi_m\right) \le \varphi \le \left(\frac{\pi}{2}i + \varphi_m\right)$,

$i = 0, 2$, имеем

$$\tau(\varphi_m)\left(\frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_m}\right)^2 \frac{\partial\phi}{\partial t} =$$

$$= \tau_0\left[\frac{W(\varphi_m)}{\cos\varphi_m}\right]^2 \phi_{xx} + \phi - \phi^3 - \lambda\theta\phi\left(1-\phi^2\right)^2;$$

– для углов $\left(\frac{\pi}{2}i - \varphi_m\right) \le \varphi \le \left(\frac{\pi}{2}i + \varphi_m\right)$,

$i = 1, 3$, имеем

$$\tau(\varphi_m)\left(\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi_m}\right)^2 \frac{\partial\phi}{\partial t} =$$

$$= \tau_0\left[\frac{W(\varphi_m)}{\cos\varphi_m}\right]^2 \phi_{yy} + \phi - \phi^3 - \lambda\theta\phi\left(1-\phi^2\right)^2.$$

Для описания кристаллизации первичных кристаллов в бинарных сплавах (основной компонент (растворитель) + второй компонент (примесь), где основной компонент образует первичные кристаллы) уравнения фазового поля имеют ту же форму, за исключением замены термического переохлаждения на комбинированное термическое и концентрационное:

$$\theta \Rightarrow \theta + Mc_\infty U.$$

Здесь M – безразмерный наклон линии liquidus, $M = \frac{-m(1-k)}{L/c_p}$; m – размерный наклон; k – коэффициент равновесного распределения примеси; c_∞ – начальная концентрация примеси в расплаве; U – безразмерная концентрация примеси,

$$U = \frac{\frac{2c/c_\infty}{1+k-(1-k\phi)} - 1}{1-k},$$

где c – локальная концентрация примеси; L – тепловыделение при затвердевании на единицу объема; c_p – теплоемкость.

К уравнениям фазового поля также добавляется уравнение диффузии для концентрации примеси U с учетом поправок, учитывающих конечную толщину переходной зоны между фазами. Величины W_0 и τ_0 определяются в зависимости от конкретной задачи [8].

Рост гранных кристаллов в среде с флуктуирующими параметрами

Рост кристаллов – существенно неустойчивый во времени процесс. Малые локальные изменения в ходе роста из-за флуктуаций температуры, дефектов кристаллической решетки, наличия дендритов – «соседей», случайного движения расплава, вращения кристалла в расплаве и т. д. могут приводить к существенному изменению морфологии.

Как правило, для небольших переохлаждений кристаллы кремния имеют гексагональную решетку. Но с ростом переохлаждения часто имеет место пе-

реход к квадратной решетке с анизотропией вида (3).

На основе алгоритмов, описанных ранее, были произведены расчеты для эволюции дендрита кремния в среде с флуктуирующими во времени и пространстве значениями температуры. Общая случайная составляющая представляла произведение временной и пространственной компонент. В размерных координатах шаг был порядка 10 нм. Расчеты выполнены для сетки 1000 × 1000 со средним переохлаждением 40 К.

В общем, для всех расчетов хорошо заметно сохранение в целом дендритной структуры. Это существенное отличие относительно роста кристаллов из металла, для которых при похожих параметрах флуктуаций наблюдалась бы полная потеря дендритной морфологии. По-видимому, значительно бо̀льшая анизотропия поверхностного натяжения для кремния сыграла существенную роль в сохранении дендритной морфологии. Напомним, что коэффициент Гиббса – Томсона, определяющий влияние поверхностного натяжения на рост кристалла, для кремния примерно на порядок больше, чем для алюминия [11]. Значение анизотропии поверхностной энергии для кремния в 5–7 раз выше [10]. Все это приводит к тому, что для подобранных периодов и величины флуктуаций, при которых кристалл алюминия имел бы произвольное число ветвей, изогнутых в различных направлениях, кристалл кремния имеет явно выраженные первичные ветви. Вторичные и третичные ветви тоже в целом сохраняют дендритную ориентацию для решеток с кубической симметрией.

Увеличение пространственной частоты осцилляций температуры приводит к более выраженной дендритной морфологии (рис. 1).

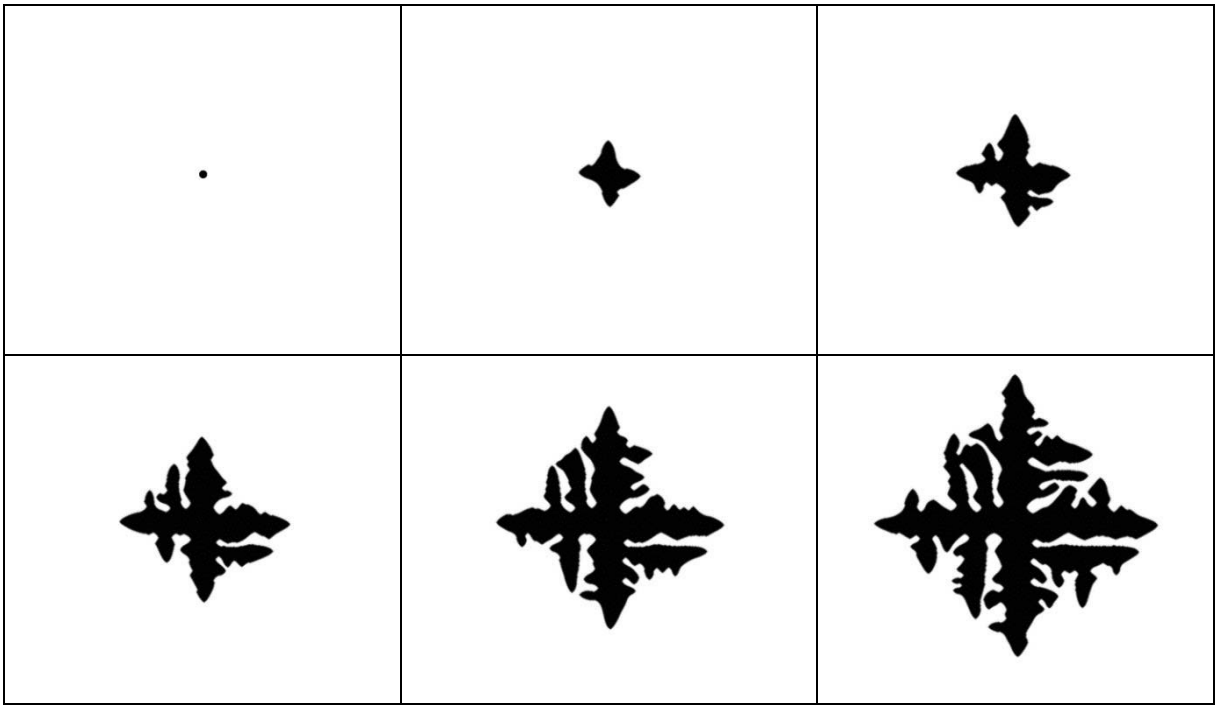


Рис. 1. Рост дендрита кремния с сильными пространственными флуктуациями переохлаждения, величина флуктуаций температуры до 25 % от общего значения переохлаждения, временные флуктуации отсутствуют

Уменьшение размаха пространственных флуктуаций сказывается на морфологии довольно слабо. По-видимому, неустойчивость роста в зоне последних по времени рисунков эволюции кристалла в каждой серии уже достаточно велика. В этих условиях кристалл имеет примерно одинаковую морфологию для всех начальных наборов флуктуаций.

Отметим также, что для малой амплитуды вторичных и третичных ветвей профиль периметра кристалла представляет из себя «пилу», в отличие от синусоидального возмущения при малой анизотропии (рис. 2).

Рис. 2. Увеличенный фрагмент части изображения из серии (см. рис. 1)

Морфология гранных кристаллов при расщеплении растущей ветви с изменением условий роста

При кристаллизации многих веществ с большой анизотропией поверхностного натяжения, например кремния, имеет место появление новых направлений роста кристалла с увеличением роста переохлаждения [12, 13]. Если направление температурного градиента не совпадает с осью кристалла, вдоль которой наблюдается преимущественный рост, может происходить расщепление растущей ветви на ряд новых. При этом могут наблюдаться как две сросшиеся ветви, например при двойниковании, так и весьма многочисленные ветви, растущие из одной исходной.

Конкретные механизмы расщепления могут быть весьма различны, однако в любом случае морфология роста должна подчиняться термодинамическим законам сохранения.

Метод фазового поля роста кристаллов давно и успешно используется для анализа морфологии растущих кристаллов и ее изменения при изменении условий роста. Тогда возникает вопрос попытки моделирования расщепления ветвей на основе метода фазового поля путем модификации функции углового распределения анизотропии поверхностного натяжения. В отличие от кристаллов с малой анизотропией, например металлов, морфология растущих ветвей неметаллов, минералов и т. п. малочувствительна к небольшим изменениям функции анизотропии. Однако введение значительного количества шума в расчеты может вызвать расщепление. При этом физическая природа этого шума не конкретизируется – это могут быть дефекты роста кристаллов,

значительное локальное изменение температурного градиента или градиента концентраций элементов кристалла и расплава и т. д. Известно, что при моделировании рост гранных кристаллов существенно зависит от уровня шума [14]. Дополнительная потеря энергии за счет возможной «неполной стыковки» старых и новых ветвей не учитывалась.

Для анализа данного явления был проведен ряд численных экспериментов по росту гранных кристаллов. Расчеты производились для случая роста первичных кристаллов из бинарного сплава. Была использована модельная среда с безразмерными параметрами: переохлаждение: $\theta = -0,46$, $\lambda = 1$, безразмерный коэффициент диффузии $\tilde{D} = 0,5$. Размер пространственного узла – 0,8; временного – 0,01. Начальный радиус зародыша составлял 11 узлов сетки.

Ввиду большого значения переохлаждения заметны случаи «попадания в ловушку» примеси, не успевшей диффундировать в расплав (белые пятна внутри черных первичных кристаллов на рисунках).

Угловое распределение анизотропии зависело от переохлаждения. Начальное распределение с шестиугольной симметрией (относительно поворота на 60 град) с изменением переохлаждения со временем заменяется на четырехугольную симметрию. Заметны переориентация направления роста ветвей и появление новых (рис. 3).

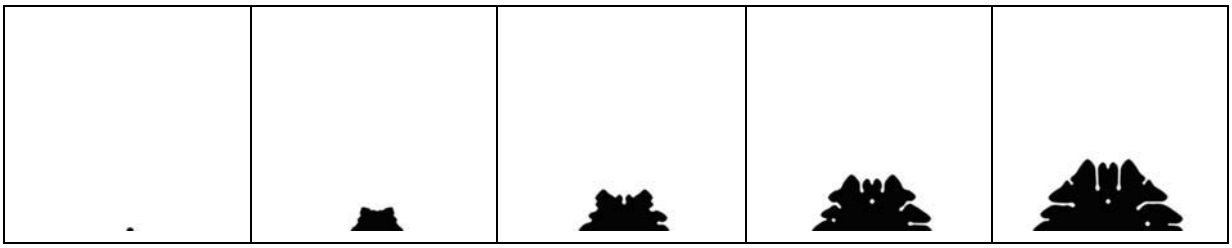


Рис. 3. Половина растущего кристалла с изменением во времени степени переохлаждения и симметрии функции анизотропии поверхностного натяжения, начальная гексагональная симметрия сменяется на четырехугольную

Здесь расчеты выполнялись для случая роста первичных кристаллов из бинарного сплава, т. е. скорость роста определялась локальной скоростью удаления второго компонента (примеси) из зоны вблизи границы твердой фазы. Для ускорения расчетов использован режим дополнительного удаления примеси из расплава на достаточно большом расстоянии от границы твердого кристалла. Практически не влияя на морфологию кристаллов, такой режим значительно ускоряет процесс счета, поскольку большая часть времени тратится на расчеты уравнения диффузии во всем вычислительном домене. Уравнение же для фазового поля решается только в достаточно узкой зоне вблизи границы кристалла.

Более того, такое удаление примеси имеет под собой и реальные основания, поскольку частично учитывает конвекцию в расплаве, влияние которой может значительно превышать влияние диффузии на удаление примеси от границы.

Также была рассчитана эволюция первичных кристаллов в случае вышеописанного бинарного сплава с перемешиванием. Был рассчитан рост кристаллов с различной степенью анизотропии для одинаковой интенсивности перемешивания (рис. 4).

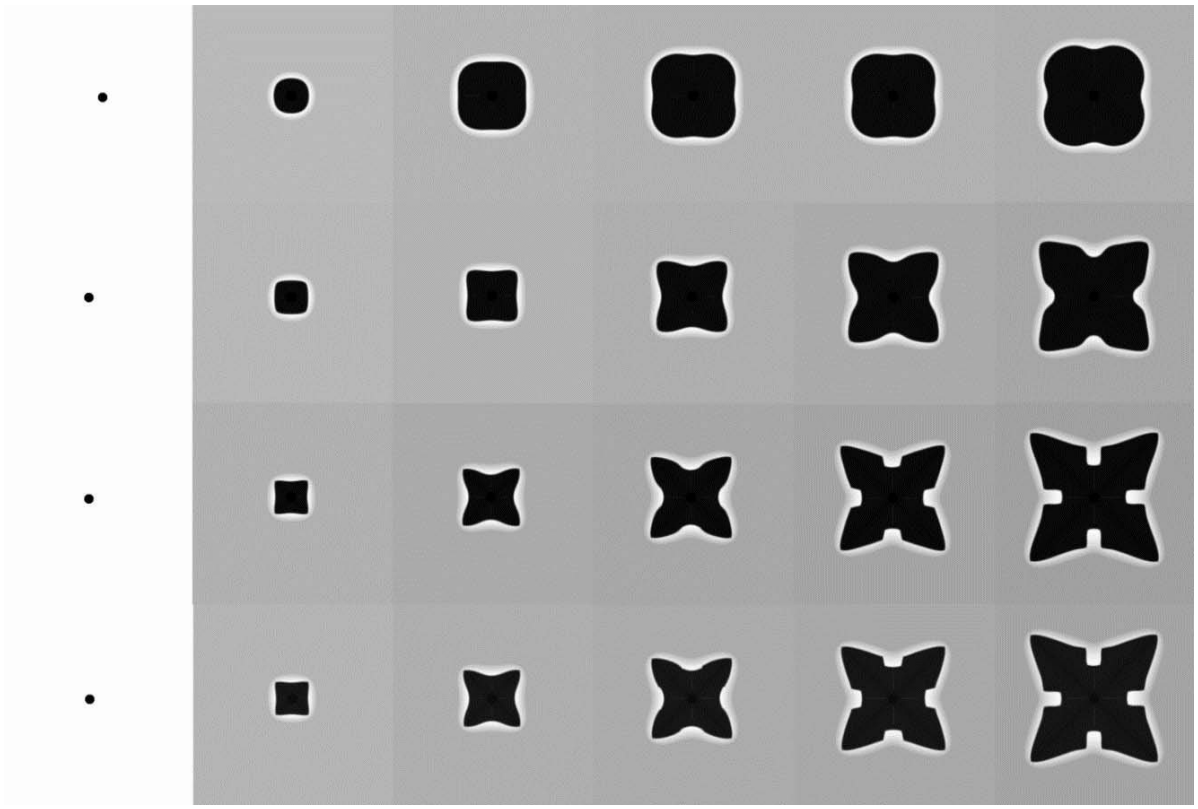


Рис. 4. Эволюция кристалла при росте с перемешиванием для различных степеней анизотропии. Ряды рисунков соответствуют значениям анизотропии ε_4: 0,01; 0,03; 0,09 и 0,17 (регуляризованное решение) сверху вниз

Два последних варианта анизотропии 0,09 и 0,17 близки друг к другу. Практически перемешивание не влияет на морфологию кристаллов для случая анизотропии более 0,09.

Как упоминалось ранее, большое многообразие возможных направлений роста гранных кристаллов приводит к большому количеству возможных морфологий. Однако такие морфологии продолжают сохранять основное свойство гранных кристаллов – отсутствие определенных ориентаций граней с высокой поверхностной энергией. Просто с изменением направления главных осей кристаллов изменяются и ориентации возможных нормалей к поверхности. Тем не менее гранные кристаллы значительно менее подвержены такому искажению формы, как изгиб поверхности или ветви на произвольный угол относительно главных осей.

Заключение

Регуляризованный алгоритм был реализован программно как для случая расплава из одного элемента, так и для роста первичных кристаллов в бинарных сплавах. Проведен анализ отличий морфологии гранных (facetted) кристаллов от обычных (unfacetted).

Большинство отличий связано с невозможностью гранных кристаллов иметь плавно изогнутую поверхность.

1. Возмущение плоского фронта, приводящее к росту ветвей, имеющее для обычных кристаллов вид синусоиды, для гранных кристаллов имеет вид «пилы».

2. Для металлических кристаллов ветви плавно изгибаются при обходе препятствий, например зон повышенной температуры или концентрации второго компонента. Для гранных кри-

сталлов ветви должны только расщепляться для обхода.

3. Проведено моделирование роста в условиях флуктуаций температуры по времени и пространству. По сравнению с обычными кристаллами влияние таких флуктуаций на морфологию значительно меньше.

4. При изменении переохлаждения у таких кристаллов часто добавляются/пропадают различные направления роста – изменяется вид функции анизотропии. Проведено моделирование роста с одновременным изменением переохлаждения и симметрии функции анизотропии в определенной области пространства. Приведены примеры морфологии расщепления ветвей.

5. Произведены расчеты для оценки влияния перемешивания расплава на морфологию кристаллов различной степени анизотропии. Показано, что при степени анизотропии выше 9 % влияние перемешивания мало.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A new phase-field model for strongly anisotropic systems / S. Torabi [et al.] // Proc. R. Soc. A. – 2009. – Vol. 465. – P. 1337–1359.

2. **Eggleston, J. J.** Ordered growth of nanocrystals via a morphological instability / J. J. Eggleston, P. W. Voorhees // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80. – P. 306–308.

3. **Wise, S. M.** Solving the regularized, strongly anisotropic Cahn-Hilliard equation by an adaptive non-linear multigrid method / S. M. Wise, J. Kim, J. S. Lowengrub // J. Comp. Phys. – 2007. – Vol. 226. – P. 414–446.

4. **Ratz, A.** Higher order regularization of anisotropic geometric evolution equations in three dimensions / A. Ratz, A. Voigt // J. Comput. Theor. Nanosci. – 2006. – № 3. – P. 560–564.

5. **Wheeler, A. A.** Phase-field theory of edges in an anisotropic crystal / A. A. Wheeler // Proc. R. Soc. A. – 2006. – Vol. 462. – P. 3363–3384.

6. **Eggleston, J. J.** A phase-field model for highly anisotropic interfacial energy / J. J. Eggleston, G. McFadden, P. W. Voorhees // Physica D. – 2001. – Vol. 150. – P. 91–103.

7. Phase-field modeling of binary alloy solidification with coupled heat and solute diffusion / J. C. Ramirez [et al.] // Physical Review E 69. – 2004.

8. **Марукович, Е. И.** Моделирование роста дендритов при кристаллизации с малым переохлаждением силуминовых сплавов на основе метода фазового поля / Е. И. Марукович, А. М. Брановицкий, Ю. А. Лебединский // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 1. – С. 4–13.

9. Phase-field modeling for facet dendrite growth of silicon / H. Kasajimaa [et al.] // Science and Technology of Advanced Materials. – 2003. – № 4. – P. 553–557.

10. Turbulent transport of oxygen in the Czochralski growth of large silicon crystals / T. Zhang [et al.] // Journal of Crystal Growth. – 1999. – Vol. 198/199 (1). – P. 141−146.

11. **Diepers, H.-J.** History effects during the selection of primary dendrite spacing. Comparison of phase-field simulations with experimental observations / H.-J. Diepers, D. Ma, I. Steinbach // Journal of Crystal growth. – 2002. – Vol. 237–239. – P. 149–163.

12. **Napolitano, R. E.** Faceted Solidification Morphologies in Low-Growth-Rate Al-Si Eutectics / R. E. Napolitano, H. Meco, C. Jung // JOM. – 2004. – Vol. 56. – P. 16–21.

13. **Shahani**, **A.** The mechanism of eutectic growth in highly anisotropic materials / A. Shahani, X. Xiao, P. Voorhees // Nat Commun. – 2016.

14. Phase-field crystal simulation facet and branch crystal growth / Z. Chen [et al.] // Applied Physics A. – 2018.

Статья сдана в редакцию 8 декабря 2023 года

Контакты:
yura_lebedinsky@mail.ru (Лебединский Юрий Анатольевич);
inmet@mail.ru (Брановицкий Александр Михайлович).

Y. A. LEBEDINSKY, A. M. BRANOVITSKY

SIMULATION OF CRYSTAL GROWTH WITH A HIGH DEGREE OF ANISOTROPY UNDER VARYING CRYSTALLIZATION CONDITIONS

Abstract

An algorithm for modeling crystal growth has been implemented by using the phase field method with regularizing the surface tension anisotropy function for the two-dimensional case. Calculations have been made for the silicon crystal growth under strong supercooling and for the growth from a hypereutectic Al-Si melt. The morphologies of crystal growth in a medium with a fluctuating temperature dependence upon the level of spatial and temporal fluctuations have been calculated for various anisotropy degrees. The morphology change is calculated for the case when the anisotropy changes from quadrangular to hexagonal symmetry during the growth. The impact of strong anisotropy is assessed for the case of crystal growth in a moving melt.

Keywords:

faceted crystals, microstructure, phase field method, modeling, morphology of primary crystals.

For citation:

Lebedinsky, Y. A. Simulation of crystal growth with a high degree of anisotropy under varying crystallization conditions / Y. A. Lebedinsky, A. M. Branovitsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 35–45.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-46-57

УДК 55.09.43

А. С. ФЕДОСЕНКО, *канд. техн. наук*, *доц.*
А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА И НАПЛАВКИ

Аннотация

Представлены результаты анализа перспективных алюминиевых сплавов для применения в области аддитивных технологий, указаны их преимущества и недостатки. Установлено влияние условий механосинтеза на физико-механические свойства частиц синтезированных порошков системы Al–Si–Mg, их форму и морфологию. Доказано, что частицы отличаются высокой твердостью и жаропрочностью.

Ключевые слова:

реакционное механическое легирование, аддитивное производство, порошок, селективное лазерное сплавление, силумин, жаропрочность, твердость.

Для цитирования:

Федосенко, А. С. Перспективные материалы на основе алюминия для послойного синтеза и наплавки / А. С. Федосенко, А. С. Оленцевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 46–57.

Введение

Алюминиевые сплавы являются незаменимыми конструкционными материалами современной промышленности. Их массово используют в большинстве отраслей промышленности от машиностроения до медицины, что обусловлено низкой плотностью, хорошей коррозионной стойкостью, высокой технологичностью. Сплавы перерабатывают в изделия самыми высокопроизводительными способами, при этом объем потребления алюминия за последние 20 лет вырос более чем в 2 раза, при среднем годовом приросте 5 %...6 % [1]. Наибольший прирост наблюдается в автомобилестроении, строительстве, электротехнике. Значительный интерес к этой группе материалов наблюдается и в области аддитивных технологий (АТ) [2–4].

В настоящее время металлические изделия в области аддитивного производства чаще всего изготавливают способами, основанными на применении в качестве исходного материала порошка, а оборудование, использующее металлические порошки, выпускается по всему миру и является общедоступным [5]. Среди широкой гаммы применяемых порошков алюминиевые сплавы занимают значительную долю. В большинстве случаев изделия изготавливают из силуминов [6–12], однако активно внедряются и другие сплавы [13–18]. Разработка новых алюминиевых сплавов направлена в первую очередь на повышение механических свойств изделий, однако зачастую это сопряжено с существенным увеличением стоимости получаемого продукта.

Целью работы являлось изучение возможности получения композиционных механически легированных порошковых материалов на основе системы алюминий–кремний, отличающихся повышенным комплексом физико-механических свойств по сравнению с классическими алюминиевыми сплавами.

© Федосенко А. С., Оленцевич А. С., 2024

Методика проведения эксперимента

Основными исходными компонентами для производства разрабатываемых механически легированных порошковых материалов являлись классические, промышленно выпускаемые порошки ПА4, а также технически чистые порошки Si, Mg. В качестве поверхностно активного вещества (ПАВ), позволяющего регулировать гранулометрический состав, использовали изопропиловый спирт.

Механическое легирование осуществлялось в механореакторе – энергонапряженной вибромельнице с рабочими камерами объемом 1 дм^3 каждая.

Синтезированные механически легированные композиционные порошки подвергались отжигу при температурах до 0,8$T_{пл}$ синтезируемого сплава. Процесс проводили в защитной среде аргона.

Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе.

Ситовой анализ осуществлялся с использованием набора сит: 0,025, 0,050, 0,063, 0,080, 0,100, 0,125, 0,250, 0,500. Разделение по фракциям проводилось на машине для сухого просеивания «Retsch 300».

Обзор алюминиевых сплавов для аддитивных технологий

Как отмечалось ранее, в настоящее время чаще всего в области АТ используют алюминиевые сплавы на основе системы алюминий–кремний. Однако в последнее время все больший интерес вызывают сплавы алюминия, легированные такими элементами, как литий, цирконий, железо, а также РЗМ, включая церий, скандий и др.

Содержание кремния в сплавах системы Al–Si достигает 22 % [19]. Наиболее часто применяют сплавы, близкие по составу к эвтектическим, что обусловлено более низкими температурой плавления и вязкостью расплава. Однако повышение литейных свойств с введением большего количества кремния сопровождается одновременным снижением прочности, что связано с формированием крупнозернистой микроструктуры. Улучшить микроструктуру позволяет модифицирование сплавов солями натрия. Это способствует повышению пластичности, благодаря формированию более мелкодисперсных кристаллов правильной формы.

Положительный эффект на свойства сплавов оказывает дополнительное введение магния, образующего с кремнием интерметаллид Mg_2Si, отличающийся высокой твердостью. Это способствует увеличению механических свойств сплавов, особенно прочности.

Порошки для послойного синтеза выпускаются металлургическими предприятиями по всему миру. Некоторые из них представлены в табл. 1. Несмотря на современные технологии производства и легирование алюминий–кремниевых сплавов, прочностные характеристики изделий из материалов данной группы по-прежнему уступают по прочности изделиям, полученным из алюминиевых сплавов других групп.

Сплавы системы Al–Cu получили название дуралюмины. Они относятся к термоупрочняемым высокопрочным сплавам, широко использующимся в промышленности. Основной легирующий элемент – медь, максимальная растворимость которой в алюминии – 5,65 %. Низкая растворимость при нормальных условиях позволяет упрочнять сплавы путем закалки и последующего старения, сопровождающегося выделением интерметаллида $CuAl_2$, формирование которого способствует увеличению прочности, твердости, жаропрочности основы.

Известны работы, направленные на изготовление изделий из сплавов систем: Al–Cu–Mg [13, 20, 21], Al–Cu [22], Al–Cu–Mg–Si [23], Al–Cu–Mg–Ni [24] и Al–Cu–Mg–Fe–Ni [25]. При этом использование данной группы материалов в настоящее время сильно ограничено, что связано с большой вероятностью

образования в процессе послойного синтеза дефектов в виде трещин, деформаций, пористости.

Табл. 1. Порошки, выпускаемые промышленными предприятиями

Производитель	Состав сплава	Гранулометрический состав, мкм
AP&C (Advanced Powders & Coatings) (Канада)	Al–Si10–Mg Al–Si7–Mg	15...63 15...63
Powder Alloy Corporation (США)	Al88–Si12	140...325
Metal Powder Industries Federation (США)	Al–Si10–Mg	0...106
AMG Aluminum UK Limited (Великобритания)	Al–Si7–Mg Al–Si10–Mg	4...150
ADDUp (Франция)	Al–Si10–Mg	20...63
Carpenter Additive (США)	Al–Si10–Mg	20...63
EOS (Германия)	Al–Si10–Mg	25...70
Xact Metal (США)	Al–Si10–Mg	20...83
Metal3dp (Китай)	Al–Si10–Mg	15...120
Tekna (Канада)	Al–Si10–Mg Al–Si7–Mg	15...63

Сплавы **системы Al–Mg** получили широкое распространение во многих отраслях промышленности. Содержание магния в них может достигать 13 %, но, как правило, это значение значительно меньше [26, 27], поскольку с ростом содержания данного элемента увеличивается вероятность образования фазы Al_3Mg_2, снижающей механические свойства.

Перспективным легирующим элементом в сплавах системы Al–Mg является **скандий**. С алюминием он образует кристаллы интерметаллида Al_3Sc, оказывающие на алюминиевую основу сильный модифицирующий эффект [17]. Введение этого элемента позволяет повысить прочность и жаропрочность алюминиевых сплавов без увеличения плотности [28, 29]. В настоящее время скандий – один из наиболее перспективных легирующих элементов алюминиевых сплавов, в том числе в качестве замены дуралюминам [17]. В области АТ модифицирующее действие скандия обеспечивает получение мелкозернистой структуры наплавляемых слоев, отличающихся высокой плотностью и хорошей стойкостью против образования горячих трещин. Основной фактор, сдерживающий широкое применение сплавов, легированных Sc, – стоимость металла, превышающая в настоящее время 20 тыс. р. за 1 кг.

Сплавы **системы Al–Li** являются единственными материалами, в которых введение легирующего элемента способствует заметному снижению их плотности, что обусловлено низкой плотностью лития, в 5 раз меньшей по сравнению с алюминием (ρ_{Li} = 0,534 г/см^3, ρ_{Al} = 2,7 г/см^3). Помимо этого, введение лития сопровождается увеличением жесткости сплавов [14, 30]. При введении в алюминий 1 % Li по массе плотность сплава снижается на 3 %, а удельная жесткость вырастает на 6 %.

Существенный недостаток сплавов, легированных литием, – неоднородная крупнозернистая микроструктура изделий, получаемых классическими способами, что снижает их механические свойства. В то же время способы аддитивного производства обеспечива-

ют большие скорости кристаллизации, создавая условия для формирования мелкозернистой структуры, что делает данные материалы привлекательными для применения в области АТ [31, 32]. Несмотря на это, их использование в настоящее время ограничено. Это обусловлено трудностями производства порошков, такими как высокая активность лития и технологическая сложность получения материалов с требуемыми характеристиками [33, 34].

Материалы **системы Al–Zn–Mg** – классические высокопрочные алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой. Основа – твердый раствор легирующих элементов в алюминии, упрочняющие фазы – интерметаллиды $MnZn_2$, $Al_2Mn_3Zn_3$, Al_2CuMg. Сплавы отличаются хорошей технологичностью, свариваемостью, коррозионной стойкостью. Они могут дополнительно легироваться марганцем, хромом, цирконием, титаном [29]. С увеличением содержания легирующих элементов растет степень упрочнения материалов термической обработкой.

Введение в материалы циркония способствует повышению температуры рекристаллизации сплавов, хром увеличивает механические свойства и стойкость к коррозии под напряжением. По прочности они превосходят дуралюмины, благодаря чему находят широкое применение в самолетостроении. Несмотря на высокие механические свойства, в настоящее время в области аддитивных технологий не используются.

Сплавы **системы Al–Ce** являются еще одной перспективной группой материалов для создания высокопрочных алюминиевых сплавов [35]. Интерес к церию во многом обусловлен его относительно низкой стоимостью по сравнению с другими элементами из группы редкоземельных металлов. В настоящее время стоимость у поставщиков варьируется в интервале 350...1200 р. за 1 кг.

С алюминием и легирующими элементами церий образует ряд эвтектик, что улучшает литейные свойства сплавов и открывает перспективы их использования в качестве замены применяемым в настоящее время силуминам [36–39].

Церий легко образует устойчивые химические соединения как с алюминием ($Al_{11}Ce_3$, α-Al_3Ce, Al_2Ce, AlCe) [35], так и с легирующими элементами, включая медь Cu_6Ce, Cu_4Ce, Cu_2Ce, CuCe [40, 41], магний $Ce(Mg,Al)_2$ [42], кремний Ce_5Si_3, Ce_3Si_2, Ce_5Si_4, CeSi, $CeSi_{2\text{-}a1}$ [43], никель Ce_7Ni_3, CeNi, $CeNi_2$, $CeNi_3$, Ce_2Ni_7, $CeNi_5$ [44] и многие др. [45–50].

В большинстве случаев в сплавах наблюдается присутствие интерметаллида $Al_{11}Ce_3$, являющегося одновременно модификатором и упрочняющей фазой.

Сплавы **алюминий–цирконий** обладают повышенным комплексом свойств благодаря модифицирующему эффекту Zr. Как правило, вводят 0,02 масс. %...0,2 масс. % этого элемента, что позволяет увеличить прочность сплавов почти в 3 раза и сохранить механические свойства до 300 °С [51, 52]. При этом, в силу существенной разницы в плотности и температурах плавления [53], производство данных сплавов затруднено. В настоящее время эффективными способами получения считаются механическое легирование [54–56] и магнетронное распыление [57].

Таким образом, в настоящее время в качестве перспективных материалов на основе алюминия рассматривается широкая гамма сплавов, однако по ряду причин в области АТ по-прежнему наиболее распространены порошки на основе системы алюминий–кремний. Эти сплавы отличаются низкой стоимостью и хорошими литейными свойствами, однако изделия из них имеют невысокую прочность. В связи с этим одной из актуальных задач промышленности является разработка технологии полу-

чения алюминий-кремниевых сплавов, сохраняющих преимущества силуминов и позволяющих при этом получать изделия с более высокими механическим свойствами.

Получение механически легированных порошков системы Al–Si–Mg

Изучение гранулометрического состава, морфологии и микроструктуры частиц синтезированных механически легированных порошков позволило установить, что их формирование в процессе обработки исходной композиции в механореакторе включает классические стадии: измельчение исходных компонентов; адгезия между образовавшимися осколками по появившимся не окисленным поверхностям; агломерация и сварка осколков с образованием компактных частиц правильной формы. При этом стоит отметить, что этап измельчения, сопровождающийся пластической деформацией и разрушением частиц исходных компонентов, выражен слабо, что обусловлено высокой пластичностью алюминия. Это ведет к тому, что спустя 1...1,5 ч обработки в механореакторе начинают получать активное развитие процессы конгломерации и сварки. Условное динамическое равновесие между процессами разрушения и объединения наступает после обработки в течение 6...8 ч. При такой длительности механосинтеза получаемый материал состоит из сформировавшихся плотных частиц правильной формы.

Введение кремния, отличающегося низкой пластичностью, существенно снижает склонность формируемых частиц к конгломерации и способствует измельчению порошков, по сравнению с механосинтезом порошков низколегированных алюминиевых сплавов [58], в состав которых, как правило, вводят значительное количество поверхностно активных веществ (ПАВ), необходимых для предотвращения чрезмерной грануляции и наваривания материала на шары и стенки камеры. В случае с разрабатываемыми материалами системы Al–Si–Mg для нормального процесса механосинтеза ПАВ вводить не обязательно, однако его использование позволит управлять размером частиц и получать порошки требуемого гранулометрического состава.

Исследование частиц синтезированных порошков показало, что увеличение длительности обработки в механореакторе приводит к эволюции их формы, которая меняется с неправильной, при длительности обработки в течение 1...2 ч (рис. 1, *а*, *б*), на близкую к сферической, при обработке в течение 6 ч (рис. 1, *г*). Увеличение длительности механосинтеза также сопровождается гомогенизацией частиц по составу.

Обработка композиций в течение более 6 ч существенно не меняет морфологию и микроструктуру частиц материалов, однако способствует увеличению их однородности.

Изучение влияния режимов механосинтеза на упрочнение частиц показало, что наиболее значимый прирост микротвердости наблюдается при изменении продолжительности обработки. При ее увеличении с 1 до 8 ч среднее значение твердости возрастает с 150 до 365 HV, что составляет более 240 % (рис. 2). При этом, несмотря на то, что обработка в течение более 6 ч вызывает менее существенный прирост микротвердости, ее значение в отдельных случаях может превышать 500 HV.

Количество ПАВ и масса загрузки в проведенной серии экспериментов оказывают на микротвердость частиц порошка менее значительное влияние.

Упрочнение синтезируемых порошков с увеличением длительности обработки сопровождается изменением их гранулометрического состава и выражается смещением среднего размера частиц в область более мелких фракций

(рис. 3, *а*). После 6 ч механосинтеза основная доля частиц имеет размер менее 63 мкм (рис. 3, *б*).

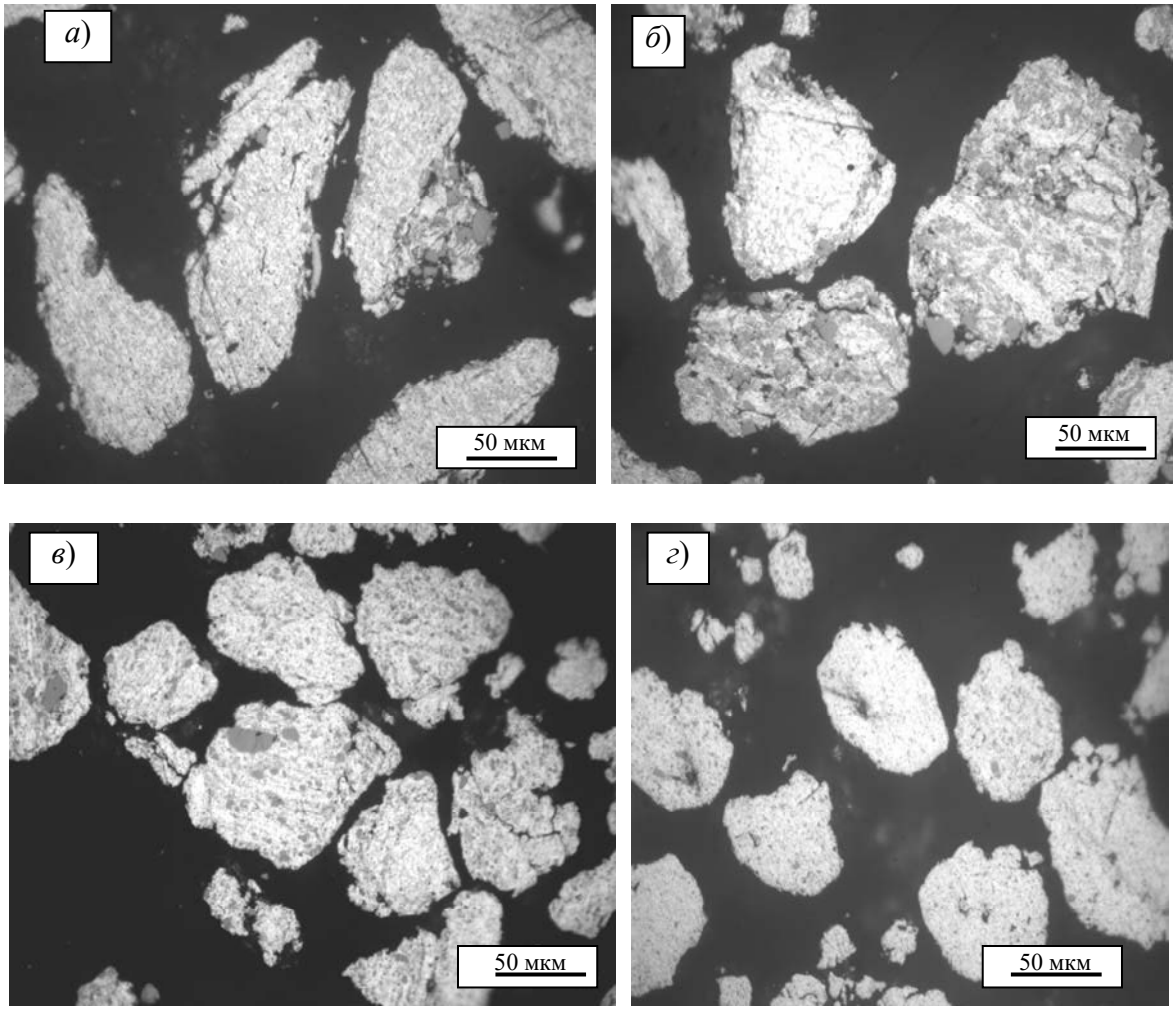


Рис. 1. Влияние длительности обработки на форму и микроструктуру частиц порошка: *а* – 1 ч; *б* – 2 ч; *в* – 4 ч; *г* – 6 ч

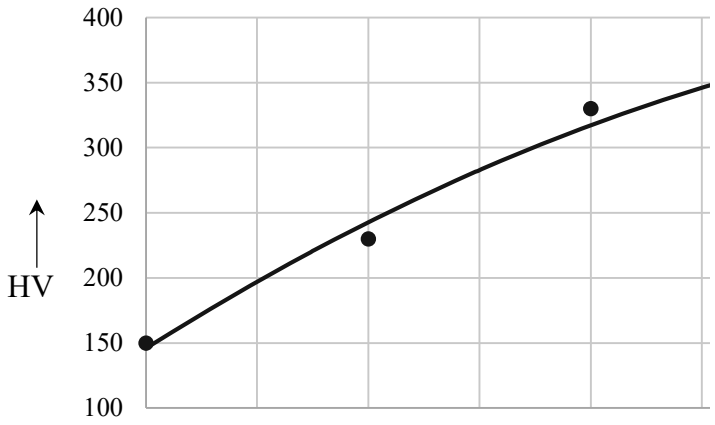


Рис. 2. Влияние длительности обработки на микротвердость частиц порошка Al–10 % Si–0,45 % Mg

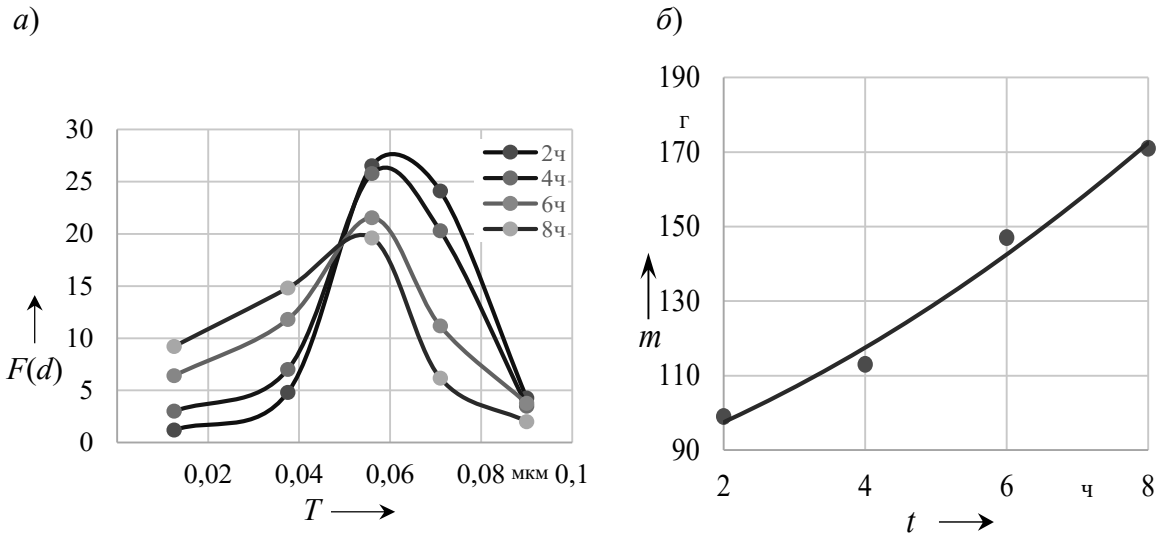


Рис. 3. Влияние длительности обработки шихты в механореакторе на изменение гранулометрического состава порошков: *а* – изменение гранулометрического состава в зависимости от длительности обработки; *б* – изменение содержания частиц с размером менее 63 мкм

Увеличение температуры помольной камеры сопровождается ростом среднего размера частиц (рис. 4). Это обусловлено тем, что с повышением температуры растет пластичность основы и активность взаимодействия между атомами компонентов.

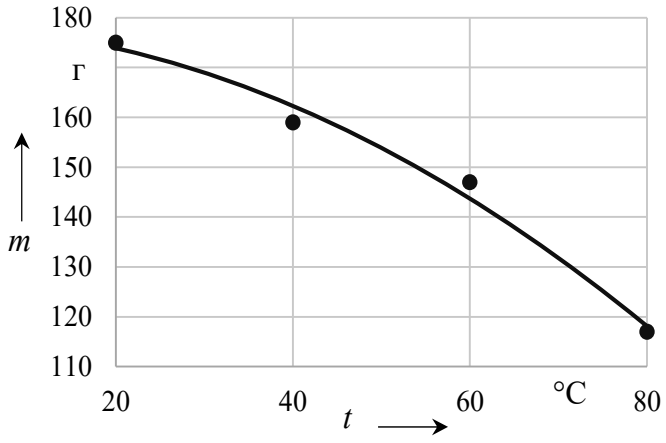


Рис. 4. Влияние температуры на содержание в синтезируемом порошке частиц размером менее 63 мкм

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что оптимальным временем обработки шихты в механореакторе, с позиции технологии, можно считать длительность 6 ч и более, поскольку это позволяет сформировать частицы с равномерным распределением компонентов и формой, близкой к сферической.

Изменение температуры позволяет влиять на средний размер частиц синтезируемых порошков и активность взаимодействия между компонентами, при этом предотвращение чрезмерной гра-

нуляции с увеличением температуры камеры потребует введения ПАВ, требуемое количество которого будет расти с увеличением ее значения.

Влияние термической обработки на характеристики частиц порошков

Термическая обработка оказывает существенное влияние на фазовый состав и свойства синтезируемых порошков [59, 60]. Она активирует взаимодействие между компонентами и приближает их фазовый состав к равновесному. В результате этого процесса выделяются термодинамически стабильные фазы интерметаллидов, оксидов, карбидов, стабилизирующие и упрочняющие основу.

С целью изучения влияния термической обработки на свойства частиц разработанных порошков системы Al–Si–Mg, материалы подвергались нагреву до температуры 450 °С.

Установлено, что максимальное значение микротвердости имеют порошки после обработки в механореакторе, и ее значение снижается при повышении температуры отжига (рис. 5, *а*). Это свидетельствует о том, что основной механизм упрочнения материалов рассматриваемой системы – наклеп, вызываемый холодной пластической деформацией в процессе механосинтеза [61]. При этом с увеличением длительности обработки микротвердость частиц возрастает (рис. 5, *б*), что свидетельствует о росте их жаропрочности.

Представленные зависимости хорошо согласуются с результатами, полученными при исследовании материалов других систем, включая порошки на основе железа, никеля, меди [58–61], и объясняются тем, что с увеличением длительности обработки степень завершения взаимодействий между компонентами растет. Это способствует выделению при последующем отжиге большего количества равновесных упрочняющих фаз, стабилизирующих основу.

Микроструктура частиц в результате отжига при температуре $0{,}8T_{пл}$ не изменяется. Они сохраняют плотное однородное строение (рис. 6).

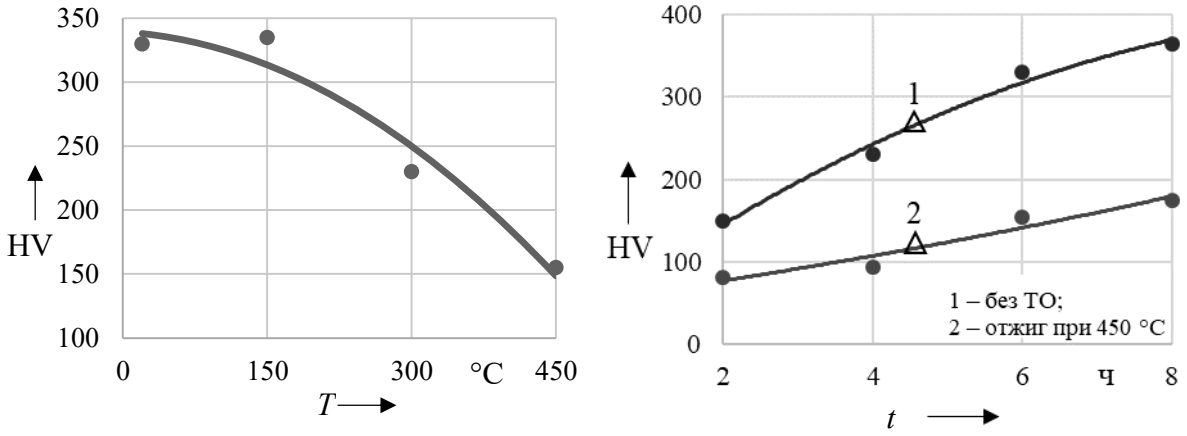


Рис. 5. Влияние отжига на микротвердость частиц механически легированного порошка: *а* – изменение микротвердости в зависимости от температуры отжига; *б* – влияние длительности механосинтеза на микротвердость отожженных частиц

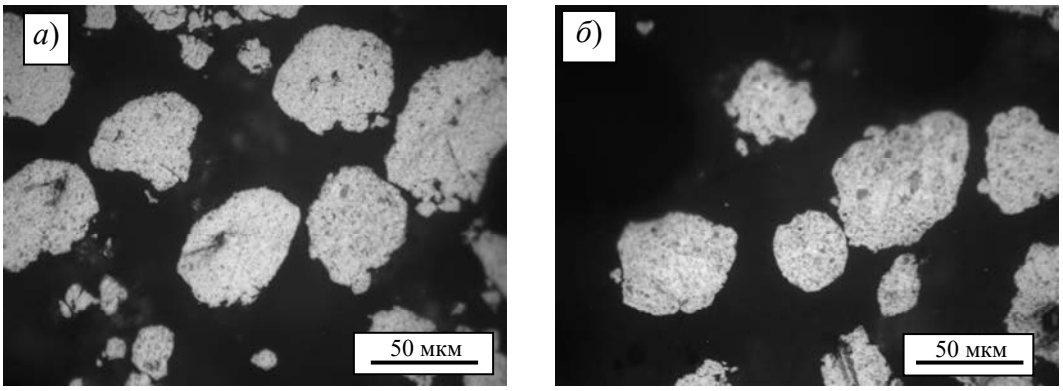


Рис. 6. Микроструктура частиц порошка до и после термической обработки: *а* – без ТО; *б* – после отжига при 450 °С

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что в большинстве случаев в области АТ для получения алюминиевых деталей используют сплавы системы Al–Si–Mg. Однако они имеют ряд недостатков, наиболее значимым из которых является невысокая прочность. Их заменой могут стать сплавы, содержащие редкоземельные металлы, а также Ti, Zr, Li. Однако многие из перечисленных элементов отличаются высокой стоимостью, а процесс получения порошков сопряжен с технологическими трудностями. Все это сильно ограничивает выпуск и применение новых сплавов на основе алюминия.

Перспективным способом получения порошков может стать реакционное механическое легирование. Данная технология позволяет синтезировать материалы, аналогичные по составу классическим силуминам, однако отличающиеся более высокой твердостью и жаропрочностью. Их применение позволит формировать изделия послойным синтезом с наследственной мелкозернистой структурой и повышенным, по сравнению с классическими материалами, комплексом физико-механических свойств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mode of access: https://belchemoil.by/news/analitika/tochka-rosta-alyuminij. – Date of access: 11.01.2023.

2. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties / E. O. Olakanmi [et al.] // Progress in Materials Science. – 2015. – Vol. 74. – P. 401–477.

3. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends / J. Zhang [et al.] // Journal of Materials Science and Technology. – 2019. – Vol. 35, № 2. – P. 270–284.

4. Selective laser melting of aluminum and its alloys / Z. Wang [et al.] // Materials. – 2020. – Vol. 13, № 20. – P. 1–67.

5. Mode of access: https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/3d-printer-73265.html. – Date of access: 11.01.2023.

6. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting / H. Rao [et al.] // Materials and Design. – 2016. – Vol. 109. – P. 334–346.

7. **Ding, X.** Heat transfer and fluid flow of molten pool during selective laser melting of AlSi10Mg powder: Simulation and experiment / X. Ding, L. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 26. – P. 280–289.

8. **Rana, A.** Effect of Oxygenated Additives on the Corrosion Behavior of Al–Si–Cu Alloy in Synthetic Condensed Automotive Solution / A. Rana, R. A. M. Majed // Journal of King Abdulaziz University Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 23, № 2. – P. 3–18.

9. A Comparative Study on the Microstructures and Mechanical Properties of Al–10Si–0,5Mg Alloys Prepared under Different Conditions / M. Guo [et al.] // Metals. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 1–20.

10. Selective laser melting of Al–Si–10Mg alloy: microstructural studies and mechanical properties assessment / P. Ashwath [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 17. – P. 2249–2258.

11. **Maeshima, T.** Solute clustering and supersaturated solid solution of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting / T. Maeshima, K. Oh-ishi // Heliyon. – 2019. – Vol. 5, № 2. – P. 1–13.

12. Microstructure and mechanical properties of Cu-modified AlSi10Mg fabricated by Laser-Powder Bed Fusion / X. Garmendia [et al.] // Materialia. – 2020. – Vol. 9. – P. 1–9.

13. Selective laser melting of high strength Al–Cu–Mg alloys: Processing, microstructure and mechanical properties / H. Zhang [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 656. – P. 47–54.

14. Additive manufacturing of binary Al-Li alloys / B. Yürekli [et al.] // Additive manufacturing binary alloys Conferenc. Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 94. – P. 69–73.

15. Strain Rate Sensitivity of the Additive Manufacturing Material Scalmalloy / P. Jakkula [et al.] // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2021. – Vol. 7, № 4. – P. 518–525.

16. Development of light weight high strength aluminum alloy for selective laser melting / N. Qbau [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, № 6. – P. 14075–14081.

17. Processing of Al-Sc aluminum alloy using SLM technology / D. Koutny [et al.] // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 74. – P. 44–48.

18. Review of high-strength aluminium alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion / P. A. Rometsch [et al.] // Materials & Design. – 2022. – Vol. 219. – P. 110779.

19. **Никитин, К. В.** Модифицирование и комплексная обработка силуминов: учебное пособие / К. В. Никитин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 92 с.

20. Processability of high strength aluminium-copper alloys AW2022 and 2024 by Laser Beam Melting in powder Bed. Annual International Solid Freeform Fabricaion Symposium [Electronic resource] / M. Karg [et al.]. – Mode of access: https://repositories.lib.utexas.edu/server/api/core/bitstreams/5b3206b3-fd34-4901-9040-5398be5af7ac/content.pdf. – Date of access: 01.08.2014.

21. Analysis of processing parameters and characteristics of selective laser melted high strength Al–Cu–Mg alloys: from single tracks to cubic samples / X. Nie [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 256. – P. 69–77.

22. Effects of process conditions on the Mechanical Behavior of aluminium wrought Alloy EN AW-2219 (AlCu6Mn) additively manufactured by Laser Beam Melting in powder Bed [Electronic resource] / M. Karg [et al.]. – Mode of access: https://doi.org/10.3390/mi8010023.pdf. – Date of access: 01.01.2017.

23. Microstructure and mechanical properties of a heat-treatable Al–3,5Cu–1,5Mg-1Si alloy produced by selective laser melting / P. Wang [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 711. – P. 562–570.

24. Processing of high strength Al–Cu alloy using 400W selective laser melting [Electronic resource] / D. Koutny [et al.]. – Mode of access: https://www.wlt.de/lim/Proceedings/Stick/PDF/Contribution347_final.pdf. – Date of access: 01.01.2015.

25. Fabrication and Characterization of high strength Al–Cu alloys processed using Laser Beam Melting in metal powder Be / B. Ahuja [et al.] // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 135–146.

26. **ГОСТ 1583–93.** Сплавы алюминиевые литейные. – Минск: Изд-во стандартов, 2003. – 29 с.

27. **ГОСТ 4784–2019.** Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 34 с.

28. SLM-processed Sc- and Zr-modified Al–Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of heat treatment / A. B. Spierings [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 701. – P. 264–273.

29. **Белецкий, В. М.** Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; под ред. И. Н. Фриляндера. – Киев: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.

30. Microstructure and Mechanical Properties of Wire + Arc Additively Manufactured 2050 Al–Li Alloy Wall Deposits / H. Zhong [et al.] // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 23. – P. 1–7.

31. Microstructure evolution and mechanical behavior of Al–Li alloy fabricated by laser melting deposition technique / S. Jiao [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 821. – P. 153125.

32. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al–Li alloys: A review / A. Abd El-Aty [et al.] // Journal of Advanced Research. – 2018. – Vol. 10. – P. 49–67.

33. 3D-printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting / N. T. Aboulkhair [et al.] // Progress in Materials Science. – 2019. – Vol. 106. – P. 100578.

34. Powders for powder bed fusion: a review / S. Vock [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 4, № 4. – P. 383–397.

35. **Czerwinski, F.** Cerium in aluminum alloys / F. Czerwinski // Journal of Materials Science. – 2020. – Vol. 55, № 1. – P. 24–72.

36. Iron in aluminum alloys. Impurity and alloying element / N. A. Belov [et al.] // Taylor & Francis. – London. – 360 p.

37. The ternary Al–Ce–Cu phase diagram in the aluminum-rich corner / N. A. Belov [et al.] // Science Direct. – 2007. – Vol. 55. – P. 5473–5482.

38. Casting aluminum alloys / V. Zolotorevsky [et al.] // Elsevier, Amsterdam. – 2007. – Vol. 1. – P. 327–396.

39. Casting alloys of the Al–Ce–Ni system: microstructural approach to alloy design / N. A. Belov [et al.] // Materials Science and Engineering A. – 1999. – Vol. 271. – P. 134–141.

40. Rare Earth Alloys: A Critical Review of the Alloy Systems of the Rare Earth, Scandium, and Yttrium Metals / K. Gschneidner [et al.] // Books on Demand. – 1961. – P. 449.

41. New phases of 3d-transition metal–cerium binary compounds: an extensive structural search / S. Xiaorui [et al.] // RSC Advances. – 2017. – Vol. 7, iss. 64. – P. 40486–40498.

42. Thermodynamic modeling of Al–Ce–Mg phase equilibria coupled with key experiments / J. Gröbner [et al.] // Intermetallics. – 2002. – Vol. 10. – P. 415–422.

43. Cerium-silicon system / M. V. Bulanova [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2002. – Vol. 345, № 1–2. – P. 110–115.

44. Reassessment of the Ce–Ni binary system supported by key experiments and ab initio calculations / W. Xiong [et al.] // Intermetallics. – 2007. – Vol. 15, № 11. – P. 1401–1408.

45. X-Ray Diffraction Study of the Phase Composition of Ce–Fe–Al Alloys Containing Ce / O. S. Zarechnyuk [et al.] // Izv. Akad. Nauk SSSR. – 1969. – Vol. 2. – P. 164–166.

46. **Eynon, J.** Magnetic and electrical properties of reentrant Ce(Fe1-xAl x)2 / J. Eynon, N. Ali // Journal of Applied Physics. – 1991. – Vol. 69. – P. 5063–5065.

47. Ce–Fe (Cerium–Iron) / H. Okamoto [et al.] // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2008. – Vol. 29. – P. 116–117.

48. Critical assessment of iron binary systems with light rare earths La, Ce, Pr, and Nd / R. Marazza [et al.] // Inorganica Chimica Acta. – 2008. – Vol. 361. – P. 3800–3806.

49. Phase equilibria and magnetic phases in the Fe-rich regions of the Ce–Fe–[Ni, Si, Al]–B quaternary systems / K. Orimoloye [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 763. – P. 289–295.

50. Investigation of the 600 °C isothermal section of the Fe–Al–Ce ternary system / H. Zheng [et al.] // International Journal of Materials Research. – 2017. – Vol. 108. – P. 36–44.

51. Influence of ultrasonic treatment on formation of primary Al_3Zr in Al–0,4Zr alloy / F. Wang [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). – 2017. – Vol. 27, № 5. – P. 977–985.

52. On the occurrence of a eutectic-type structure in solidification of Al–Zr alloys / F. Wang [et al.] // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 133. – P. 75–78.

53. **Junea, J. M.** Preparation of aluminium–zirconium master alloys / J. M. Junea // Indian J Eng Mater Sci. – 2002. – Vol. 9. – P. 187–190.

54. Phase evolution of Mg–Al–Zr nanophase alloys prepared by mechanical alloying / N. Al-Aqeeli [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – Vol. 400, № 1–2. – P. 96–99.

55. Development of new Al-based nanocomposites by mechanical alloying / N. Al-Aqeeli [et al.] // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 480, № 1–2. – P. 392–396.

56. **Muthaiah, V. M. S.** Effect of zirconium on thermal stability of nanocrystalline aluminium alloy prepared by mechanical alloying / V. M. S. Muthaiah, S. Mula // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 688. – P. 571–580.

57. Al–Zr alloys synthesis: Characterization of suitable multicomponent low-temperature melts / E. Kubiňáková [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9. – P. 594–600.

58. **Витязь, П. А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 351 с.

59. **Ловшенко, Ф. Г.** Теоретические и технологические аспекты получения механически легированных порошков для производства покрытий и изделий аддитивными методами / Ф. Г. Ловшенко, Е. И. Марукович, А. С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2021. – № 4. – С. 62–73.

60. **Ловшенко, Ф. Г.** Механически легированные жаропрочные порошки для производства изделий аддитивными технологиями / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 405 с.

61. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов: монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.

Статья сдана в редакцию 30 января 2024 года

Контакты:
5trannik@tut.by (Федосенко Алексей Сергеевич);
capsloock3333@mail.ru (Оленцевич Алексей Сергеевич).

A. S. FEDOSENKO*, *A. S. OLIENTSEVICH

PROMISING ALUMINUM-BASED MATERIALS FOR LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS AND SURFACING

Abstract

The results of analysis of promising aluminum alloys for application in the field of additive technologies are presented, their advantages and disadvantages being indicated. The influence of mechanosynthesis conditions on physical and mechanical properties of particles of synthesized powders of the Al–Si–Mg system, as well as on their shape and morphology, has been established. It has been proven that the particles are characterized by high hardness and heat resistance.

Keywords:

reactive mechanical alloying, additive manufacturing, powder, selective laser melting, silumin, heat resistance, hardness.

For citation:

Fedosenko, A. S. Promising aluminum-based materials for layer-by-layer synthesis and surfacing / A. S. Fedosenko, A. S. Olientsevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 46–57.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-58-67

УДК 621.833

С. Н. ХАТЕТОВСКИЙ[1], *канд. техн. наук*, *доц.*
П. Н. ГРОМЫКО[1], *д-р техн. наук*, *проф.*
Д. С. ГАЛЮЖИН[1], *канд. техн. наук*, *доц.*
М. А. ГАЛЮЖИН[1]
К. К. ГУЛЯЕВ[2]
[1]Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)
[2]Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий (Могилев, Беларусь)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗВЕНЬЕВ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ТИПА 2К-Н

Аннотация

Рассмотрен один из аспектов проблемы обеспечения эксплуатационных свойств механических передач при минимизации их габаритных параметров. Приведен пример прецессионной передачи, которая в некоторых случаях имеет меньшую, чем аналогичные по структуре плоские эксцентриковые передачи, чувствительность эксплуатационных свойств к нарушению геометрии зацепления. Выявлены проблемы научного анализа деформаций звеньев прецессионной передачи. Для прецессионной передачи типа 2К-Н с помощью метода Мора проведен анализ деформаций входного вала как одного из наиболее ответственных звеньев.

Ключевые слова:

прецессионная передача, эксцентриковая передача, оптимизация конструкции, упругие деформации, эксплуатационные свойства, метод Мора.

Для цитирования:

К вопросу оценки упругих деформаций звеньев прецессионной передачи типа 2К-Н / С. Н. Хатетовский, П. Н. Громыко, Д. С. Галюжин, М. А. Галюжин, К. К. Гуляев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 58–67.

Введение

Современные машины и механизмы нуждаются в малогабаритных механических приводах, имеющих относительно высокий КПД и низкую себестоимость изготовления. Механические приводы, создаваемые на основе известных видов червячных и зубчатых передач, во многих случаях не удовлетворяют вышеуказанным требованиям, т. к. при малых габаритах передач неизбежны упругие деформации их звеньев, которые приводят к ухудшению эксплуатационных показателей, в том числе КПД и кинематической точности.

Требованию малогабаритности отвечают эксцентриковые передачи [1]. Проблема минимизации упругих деформаций звеньев эксцентриковых передач решается путем использования соответствующих материалов, специальных методов термохимической обработки, а также обеспечением высокой точности изготовления и сборки. Себестоимость изготовления эксцентриковых передач по вышеуказанной причине достаточно высока.

Другой путь обеспечения высоких эксплуатационных свойств эксцентриковых передач при малых габаритных размерах – это минимизация влияния упругих деформаций звеньев на данные свойства путем оптимизации структуры передач, в частности путем перехода от структуры плоской передачи к структуре пространственной, в том числе прецессионной, передачи [2]. При этом,

© Хатетовский С. Н., Громыко П. Н., Галюжин Д. С., Галюжин М. А., Гуляев К. К., 2024

очевидно, придется решать задачу оценки упругих деформаций звеньев. Деформации звеньев зубчатой передачи зависят от сил, действующих в зацеплении, от формы и размеров звеньев, а также от связей, наложенных на них.

Для прецессионной передачи, как для разновидности эксцентриковой передачи, наибольшее распространение получило цевочное зацепление колес. Это зацепление образуется путем контакта цевок, закрепленных на центральном или сателлитном колесе, с зубьями сопряженного сателлитного или центрального колеса соответственно. В отличие от плоского случая цевочного зацепления [3] цевочное пространственное зацепление прецессионной передачи характеризуется тем, что при различных относительных положениях центрального и сателлитного колес наблюдается существенное изменение длины контактных линий (рис. 1), а также существенное изменение направления контактных сил. Поэтому методика определения сил, действующих в зацеплении, которая может использоваться в случае плоского цевочного зацепления [3], для прецессионной передачи не вполне пригодна. Методика глубокого анализа контактных сил, действующих в традиционных зубчатых передачах, приведенная в [4], подразумевает определение указанных сил при различных относительных положениях колес с целью учета коэффициента перекрытия, разной длины контактных линий и других факторов. Для рассматриваемого варианта прецессионной передачи разработаны основы методики определения контактных сил с учетом таких факторов, как коэффициент перекрытия и длина контактных линий [5].

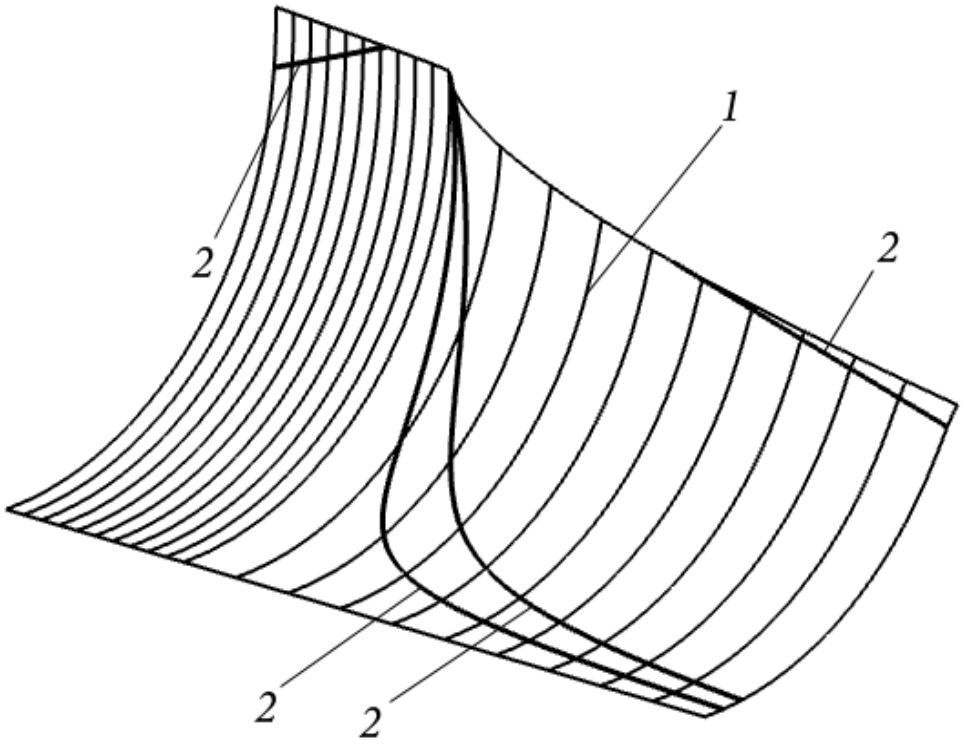


Рис. 1. Вид компьютерной модели рабочей поверхности зуба сателлитного колеса прецессионной передачи: *1* – изопараметрическая кривая; *2* – линии контакта при различных относительных положениях центрального и сателлитного колес

Основная часть

В [5] приведен анализ упругих деформаций входного вала прецессионной передачи типа K-H-V. Типу K-H-V планетарной, в том числе прецессионной, передачи, согласно классификации, изложенной в [6], соответствует кинематическая схема, представленная на рис. 2.

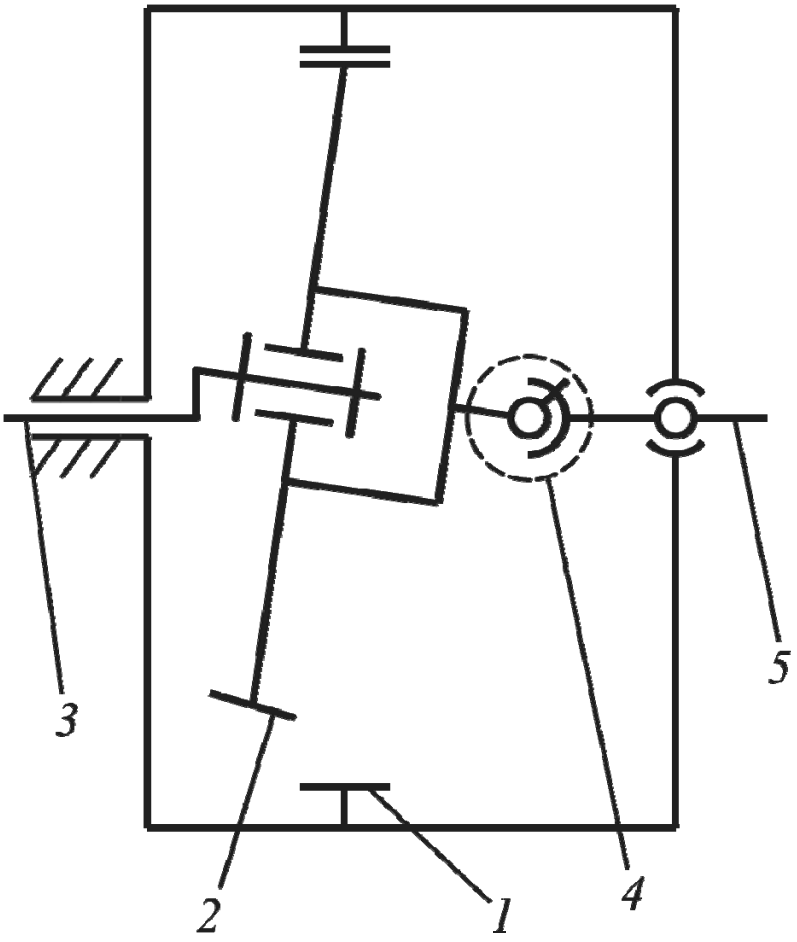


Рис. 2. Кинематическая схема прецессионной передачи типа K-H-V: *1* – центральное колесо; *2* – сателлитное колесо; *3* – входной вал; *4* – шарнир равных угловых скоростей; *5* – выходной вал

Входной вал прецессионной передачи типа K-H-V установлен в корпусе консольно, что является частным случаем. Возможен другой частный случай, когда входной вал установлен на двух опорах, что встречается в конструкции прецессионной передачи типа 2K-H (рис. 3). На рис. 3 опоры входного вала обозначены *A* и *B*. Тип 2K-H планетарной, в том числе прецессионной, передачи, как и тип K-H-V, определяется в [6].

Согласно кинематической схеме, представленной на рис. 2, сателлит, состоящий из двух сателлитных колес, установлен на входном валу, образуя с ним вращательную цилиндрическую одноподвижную кинематическую пару, определяемую в [7]. В реальной конструкции прецессионной передачи типа 2K-H указанная кинематическая пара может быть заменена эквивалентным кинематическим соединением. В случае относительно небольших значений угла нутации [2] это кинематическое соединение может представлять собой два

сферических подшипника, установленных на входном валу (рис. 4). При этом входной вал выполняется цилиндрическим и с двумя эксцентриками. Ввиду отсутствия необходимости учета сил, действующих вдоль оси входного вала, подшипниковые опоры условно представляем в виде шарнирно-подвижных опор *C* и *D*.

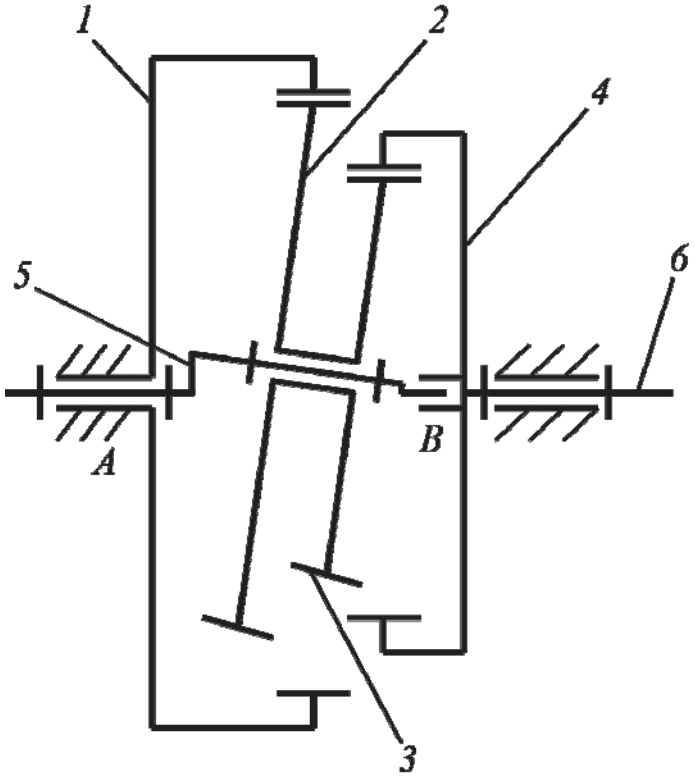


Рис. 3. Кинематическая схема прецессионной передачи типа 2K-H: *A* – левая опора входного вала; *B* – правая опора входного вала; *1* – неподвижное центральное колесо; *2* – входное сателлитное колесо; *3* – выходное сателлитное колесо; *4* – подвижное центральное колесо; *5* – входной вал; *6* – выходной вал

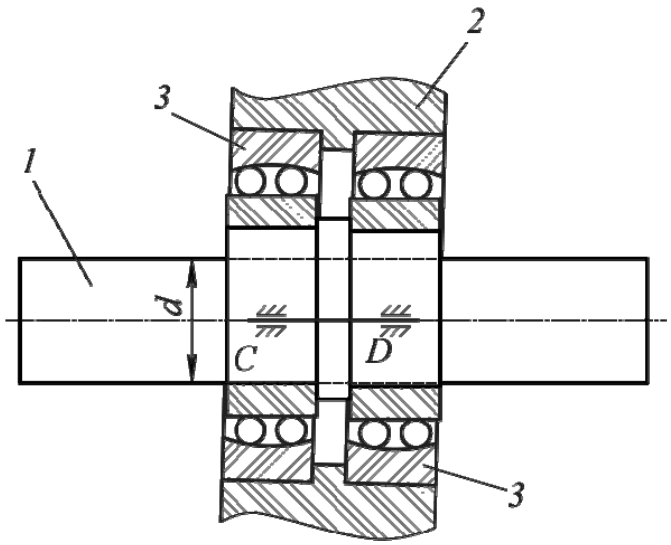


Рис. 4. Схема кинематического соединения сателлита и входного вала прецессионной передачи типа 2K-H: *1* – входной вал; *2* – сателлит; *3* – сферический подшипник

Машиностроение

Для упрощения расчетов принимаем для входного вала один диаметр *d*, равный наименьшему диаметру его шеек. Таким образом, получаем пространственную расчетную схему сателлита, показанную на рис. 5.

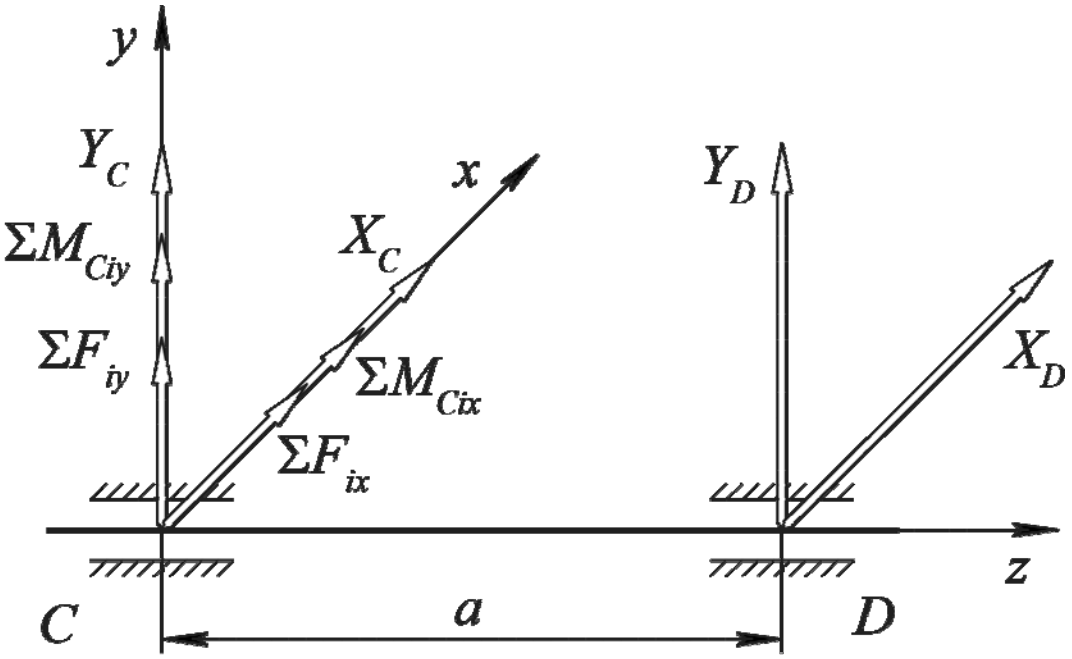


Рис. 5. Расчетная схема сателлита прецессионной передачи типа 2К-Н

Составляем уравнения равновесия сателлита:

$$\sum F_{xi} = 0;$$

$$\sum F_{ix} + X_C + X_D = 0; \qquad (1)$$

$$\sum F_{yi} = 0;$$

$$\sum F_{iy} + Y_C + Y_D = 0; \qquad (2)$$

$$\sum M_{Cyi} = 0;$$

$$X_D \cdot a + \sum M_{Ciy} = 0; \qquad (3)$$

$$\sum M_{Cxi} = 0;$$

$$-Y_D \cdot a + \sum M_{Cix} = 0, \qquad (4)$$

где $\sum F_{ix}$ – суммарная проекция активных сил на ось *x*; $\sum F_{iy}$ – суммарная проекция активных сил на ось *y*; $\sum M_{Cix}$ – суммарный момент активных сил относительно оси *x*; $\sum M_{Ciy}$ – суммарный момент активных сил относительно оси *y*.

Вышеуказанные активные силы находим по методике, изложенной в [2].

Решая систему уравнений (1)–(4), определяем реакции опор *C* и *D*:

$$Y_D = \frac{\sum M_{Cix}}{a}; \qquad (5)$$

$$Y_C = -\sum F_{iy} - \frac{\sum M_{Cix}}{a}; \qquad (6)$$

$$X_D = -\frac{\sum M_{Ciy}}{a}; \qquad (7)$$

$$X_C = -\sum F_{ix} + \frac{\sum M_{Ciy}}{a}. \qquad (8)$$

Составляем пространственную расчетную схему входного вала (рис. 6).

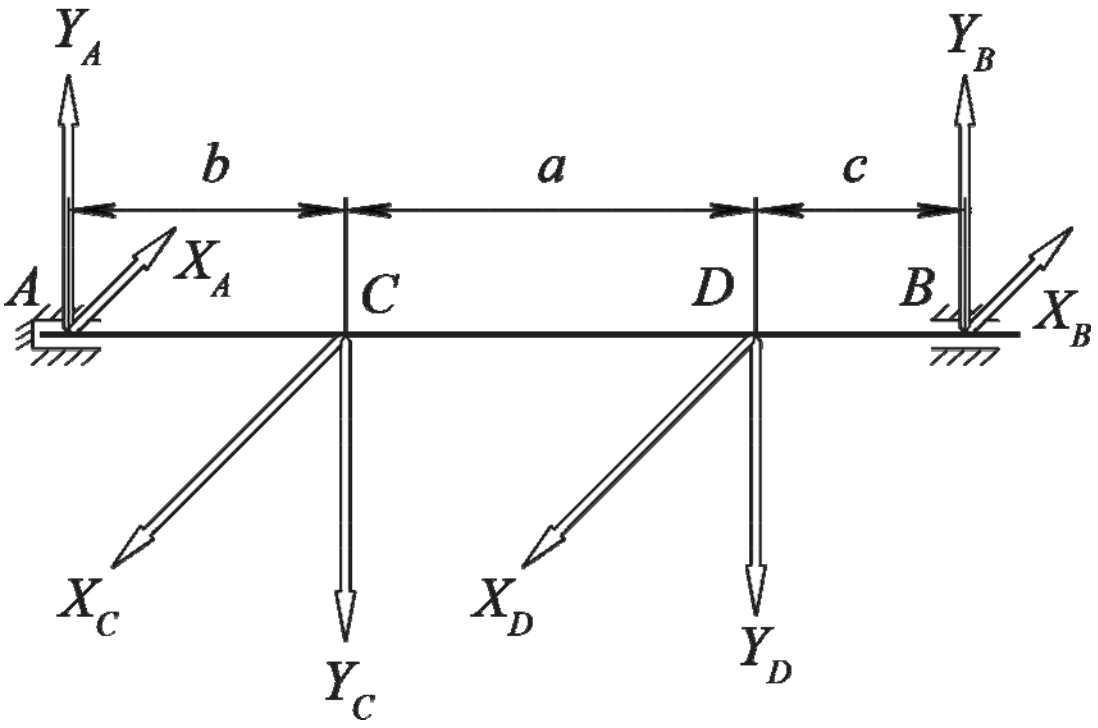


Рис. 6. Расчетная схема входного вала прецессионной передачи типа 2К-Н

Составив уравнения равновесия входного вала, определяем реакции опор *A* и *B*:

$$X_A = \frac{X_C \cdot (a+c) + X_D \cdot c}{a+b+c}; \qquad (9)$$

$$Y_A = \frac{Y_C \cdot (a+c) + Y_D \cdot c}{a+b+c}; \qquad (10)$$

$$X_B = \frac{X_C \cdot b + X_D \cdot (a+b)}{a+b+c}; \qquad (11)$$

$$Y_B = \frac{Y_C \cdot b + Y_D \cdot (a+b)}{a+b+c}. \qquad (12)$$

Расчет прогиба входного вала необходимо производить в двух плоскостях, находя перемещения δ_x и δ_y по координатам x и y соответственно. Затем общий прогиб находится по формуле из [5]:

$$\Delta = \sqrt{\delta_x{}^2 + \delta_y{}^2}. \qquad (13)$$

Схема для определения перемещения точки *C* под действием сил, расположенных в плоскости *yz*, представлена на рис. 7.

Согласно методу Мора перемещение точки *C* по оси *y* находится по формуле

$$\delta_{Cy} = \frac{1}{E \cdot I_x} \cdot \left(\int_0^b \frac{Y_C \cdot (a+c) + Y_D \cdot c}{a+b+c} \cdot z_1 \cdot \frac{a+c}{a+b+c} \cdot z_1 \, \mathrm{d}z + \right.$$

$$+ \int_0^a \left(\frac{Y_C \cdot (a+c) + Y_D \cdot c}{a+b+c} \cdot (z_2 + b) - Y_C \cdot z_2 \right) \cdot \left(\frac{a+c}{a+b+c} \cdot (b + z_2) - z_2 \right) \mathrm{d}z +$$

$$\left. + \int_0^c \frac{Y_C \cdot b + Y_D \cdot (a+b)}{a+b+c} \cdot z_3 \cdot \frac{b}{a+b+c} \cdot z_3 \, \mathrm{d}z \right). \qquad (14)$$

Схема для определения перемещения точки D под действием сил, расположенных в плоскости yz, представлена на рис. 8.

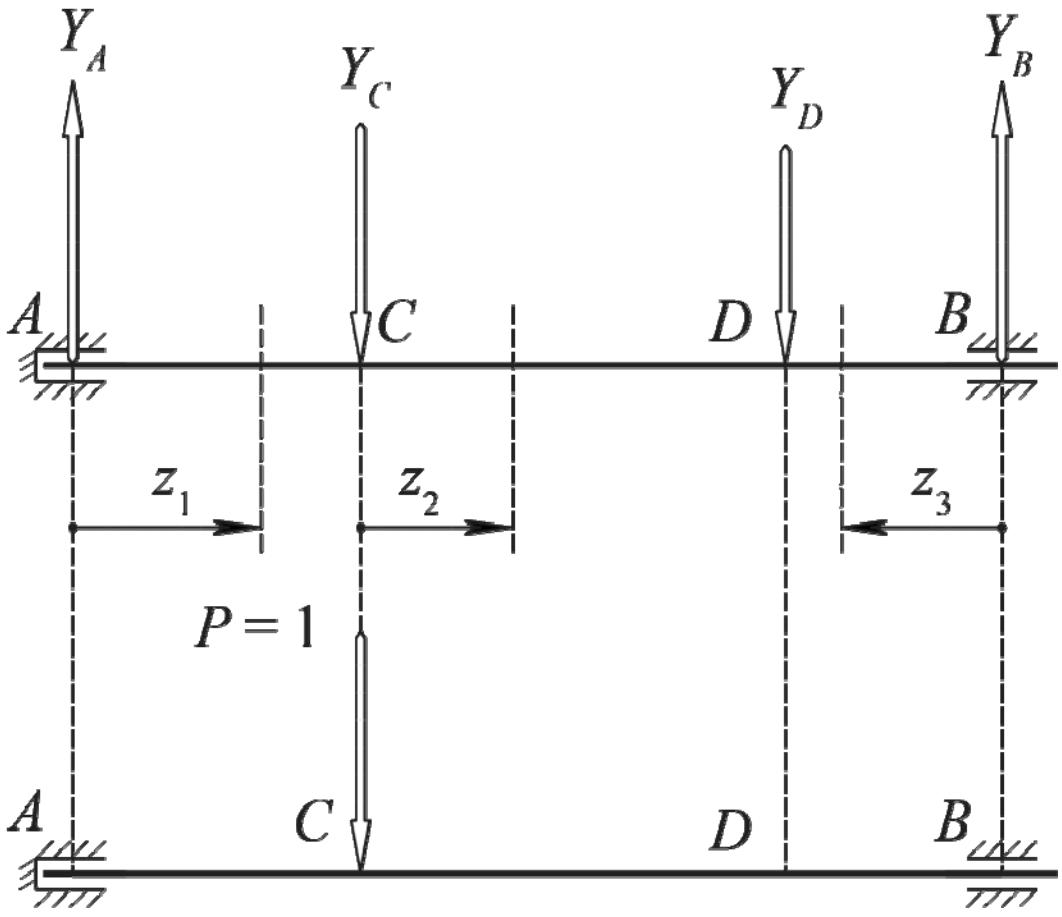


Рис. 7. Схема нагружения входного вала прецессионной передачи типа 2К-Н в плоскости yz для определения перемещения точки C

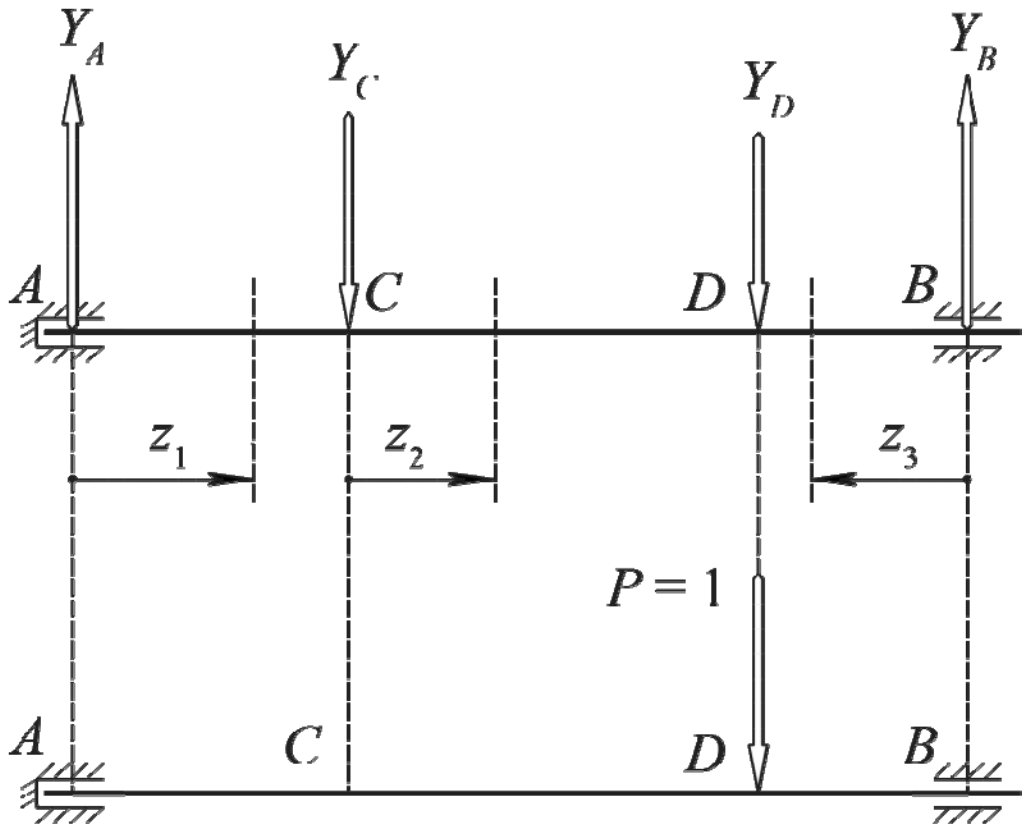


Рис. 8. Схема нагружения входного вала прецессионной передачи типа 2К-Н в плоскости *yz* для определения перемещения точки *D*

Согласно методу Мора перемещение точки *D* по оси *y* находится по формуле

$$\delta_{Dy} = \frac{1}{E \cdot I_x} \cdot \left(\int_0^b \frac{Y_C \cdot (a+c) + Y_D \cdot c}{a+b+c} \cdot z_1 \cdot \frac{c}{a+b+c} \cdot z_1 \, \mathrm{d}z + \right.$$

$$+ \int_0^a \left(\frac{Y_C \cdot (a+c) + Y_D \cdot c}{a+b+c} \cdot (z_2 + b) - Y_C \cdot z_2 \right) \cdot \frac{c}{a+b+c} \cdot (b + z_2) \, \mathrm{d}z +$$

$$\left. + \int_0^c \frac{Y_C \cdot b + Y_D \cdot (a+b)}{a+b+c} \cdot z_3 \cdot \frac{a+b}{a+b+c} \cdot z_3 \, \mathrm{d}z \right). \qquad (15)$$

Аналогично рассчитывается прогиб входного вала в точках *C* и *D* для сил, расположенных в плоскости *xz*:

$$\delta_{Cx} = \frac{1}{E \cdot I_y} \cdot \left(\int_0^b \frac{X_C \cdot (a+c) + X_D \cdot c}{a+b+c} \cdot z_1 \cdot \frac{a+c}{a+b+c} \cdot z_1 \, \mathrm{d}z + \right.$$

$$+ \int_0^a \left(\frac{X_C \cdot (a+c) + X_D \cdot c}{a+b+c} \cdot (z_2 + b) - X_C \cdot z_2 \right) \cdot \left(\frac{a+c}{a+b+c} \cdot (b + z_2) - z_2 \right) \mathrm{d}z +$$

$$\left. + \int_0^c \frac{X_C \cdot b + X_D \cdot (a+b)}{a+b+c} \cdot z_3 \cdot \frac{b}{a+b+c} \cdot z_3 \, \mathrm{d}z \right). \quad (16)$$

$$\delta_{Dx} = \frac{1}{E \cdot I_y} \cdot \left(\int_0^b \frac{X_C \cdot (a+c) + X_D \cdot c}{a+b+c} \cdot z_1 \cdot \frac{c}{a+b+c} \cdot z_1 \, \mathrm{d}z + \right.$$

$$+ \int_0^a \left(\frac{X_C \cdot (a+c) + X_D \cdot c}{a+b+c} \cdot (z_2 + b) - X_C \cdot z_2 \right) \cdot \frac{c}{a+b+c} \cdot (b + z_2) \, \mathrm{d}z +$$

$$\left. + \int_0^c \frac{X_C \cdot b + X_D \cdot (a+b)}{a+b+c} \cdot z_3 \cdot \frac{a+b}{a+b+c} \cdot z_3 \, \mathrm{d}z \right). \quad (17)$$

Заключение

Были определены упругие прогибы входного вала прецессионной передачи типа 2К-Н, что позволит на стадии проектирования учесть их влияние на кинематические и энергетические показатели самой передачи. Проведенный анализ отличается тем, что основан на полученных ранее зависимостях сил, действующих в зацеплении, от геометрии передачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скойбеда, А. Т.** Коническо-цилиндрические прецессионные редукторы (КЦПР) / А. Т. Скойбеда, П. Н. Громыко. – Минск: БГПА, 2001. – 189 с.

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

3. **Шанников, В. М.** Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В. М. Шанников. – Ленинград: Машгиз, 1948. – 172 с.

4. **Заблонский, К. И.** Жесткость зубчатых передач / К. И. Заблонский. – Киев: Техніка, 1967. – 259 с.

5. **Хатетовский, С. Н.** К вопросу оценки упругих деформаций звеньев прецессионной передачи / С. Н. Хатетовский, Л. Г. Доконов, Д. С. Галюжин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4. – С. 61–69.

6. Планетарные передачи. Справочник / В. Н. Кудрявцев [и др.]. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 536 с.: ил.

7. **Крайнев, А. Ф.** Словарь-справочник по механизмам / А. Ф. Крайнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1987. – 560 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 27 декабря 2023 года

Контакты:
mechlab@yandex.ru (Хатетовский Станислав Николаевич);
grom_7@tut.by (Громыко Петр Николаевич);
daniel_24@rambler.ru (Галюжин Даниил Сергеевич);
Mikhail.instabilis@gmail.com (Галюжин Михаил Александрович);
gkk2004@inbox.ru (Гуляев Кирилл Константинович).

S. N. KHATETOVSKY*, *P. N. GROMYKO*, *D. S. GALYUZHIN*, *M. A. GALYUZHIN*, *K. K. GULYAEV

ON ESTIMATING ELASTIC DEFORMATIONS OF LINKS IN 2K-H TYPE PRECESSIONAL TRANSMISSIONS

Abstract

An aspect of the problem of ensuring performance characteristics of mechanical transmissions while minimizing their overall dimensions is considered. As an example, precessional transmission is given, which in certain cases has a lower sensitivity of its operational properties to the violation of engagement geometry than flat eccentric transmissions, similar in structure. The problems of scientific analysis of deformations of precession transmission links are revealed. Deformations of the input shaft, as one of the critical links, are analyzed for precessional transmission of the 2K-H type by using the Mohr's method.

Keywords:

precessional transmission, eccentric transmission, design optimization, elastic deformations, performance characteristics, Mohr's method.

For citation:

On estimating elastic deformations of links in 2K-H type precessional transmissions / S. N. Khatetovsky, P. N. Gromyko, D. S. Galyuzhin, M. A. Galyuzhin, K. K. Gulyaev // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 58–67.

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-68-76

УДК 629.114.2

Э. И. ЯСЮКОВИЧ, *канд. техн. наук*, *доц.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО КУРСОВОГО ДВИЖЕНИЯ ТРЕХОСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Аннотация

Разработаны имитационная математическая модель курсового движения трехосной колесной машины с учетом вертикальной динамики и программное обеспечение для оценки влияния положения линии мгновенных центров поворота управляемых колес на ее курсовую устойчивость и управляемость.

Ключевые слова:

трехосная колесная машина, имитационная математическая модель, линия мгновенных центров поворота управляемых колес, вертикальная динамика, курсовая устойчивость, управляемость.

Для цитирования:

Ясюкович, Э. И. Имитационное моделирование управляемого курсового движения трехосных колесных машин / Э. И. Ясюкович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 68–76.

Введение

Эффективность управляемого движения, курсовая устойчивость и управляемость многоосных грузовых колесных машин существенно зависят от их массогеометрических параметров, упругодиссипативных характеристик подвески и шин, а также от положения линии мгновенных центров поворота их управляемых колес [1–3].

В работе для оценки влияния положения указанной линии на перечисленные показатели разработаны имитационная математическая модель и соответствующее программное обеспечение (ПО). Разработанное ПО позволяет выполнять расчетные исследования управляемого курсового движения грузовых трехосных колесных машин по недеформируемой опорной поверхности со случайным макро- и микропрофилем, а также оценить влияние основных массогеометрических параметров, упругодиссипативных характеристик подвески и шин на курсовую устойчивость и управляемость названных машин.

Основная часть

Возникающие при курсовом движении колесных машин боковые реакции опорной поверхности на их шины зависят от кривизны траектории движения и вертикальных реакций дороги. Поэтому разрабатываемые имитационные математические модели курсового движения названных машин должны содержать не только уравнения курсового движения, но и уравнения вертикальной динамики подрессоренной и неподрессоренных масс, необходимые для определения боковых составляющих указанных вертикальных реакций.

При управляемом курсовом движении колесных машин без бокового проскальзывания шин нормали к их вертикальным плоскостям должны пересекаться в одной точке на линии мгновенных центров поворота – точке О (рис. 1).

Указанная линия перпендикулярна центральной продольной оси остова колесной машины, а эффективность ее управляемого курсового движения зависит от положения указанной линии, которая определяется соотношением

© Ясюкович Э. И., 2024

углов поворота управляемых колес ее передней, средней и задней осей при выполнении криволинейного движения.

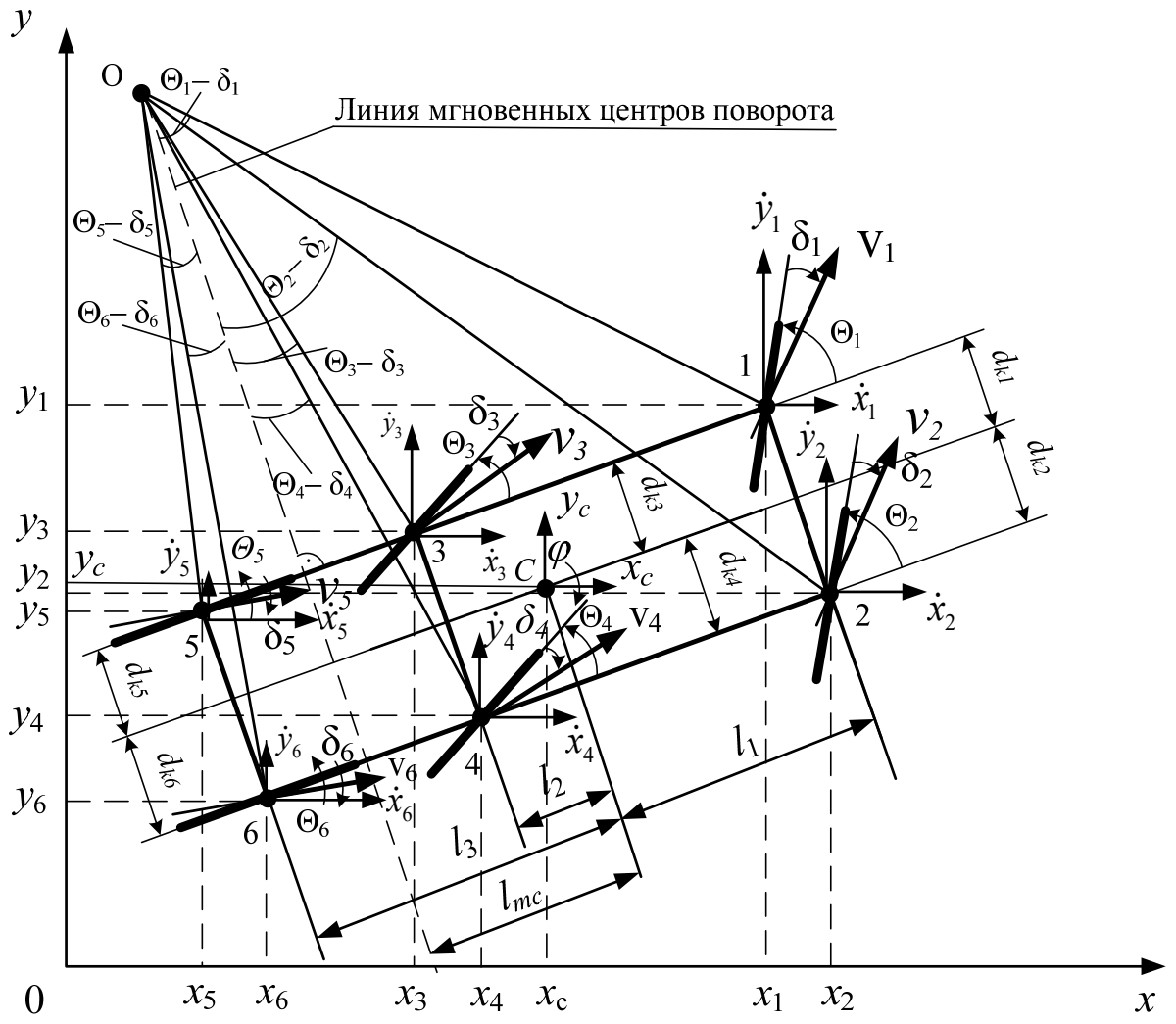


Рис. 1. Расчетная схема курсового движения трехосной колесной машины

В расчетной схеме (см. рис. 1) используются следующие независимые обобщенные координаты: x_c, y_c, z_c – перемещения центра масс колесной машины по продольной 0X, поперечной 0У и вертикальной 0Z осям; $z_1 \ldots z_6$ – вертикальные перемещения центров неподрессоренных масс (колес); φ, Ψ, Ф – курсовой угол, углы бокового крена и тангажа остова; $\lambda_1 \ldots \lambda_6$ – углы увода шин колес.

Параметры l_1, l_2, l_3, l_{mc} – это массогеометрические параметры, определяющие расстояния от центра масс колесной машины до центров ее передней, средней, задней осей и до точки проекции нормали из точки О на продольную ось колесной машины; $\Theta_1 \ldots \Theta_6$ – углы поворота управляемых колес вокруг их вертикальных осей; d_{k1}, d_{k2}, d_{k3}, d_{k4}, d_{k5}, d_{k6} – левая и правая половины ширины колеи передней, средней и задней осей; $v_1 \ldots v_6$ – линейные продольные скорости перемещения центров колес.

Поскольку разрабатываемая математическая модель содержит два компонента – курсовое движение и вертикальная динамика, то для вывода ди-

намических уравнений ее курсового движения использовалась также расчетная схема вертикальной динамики (рис. 2).

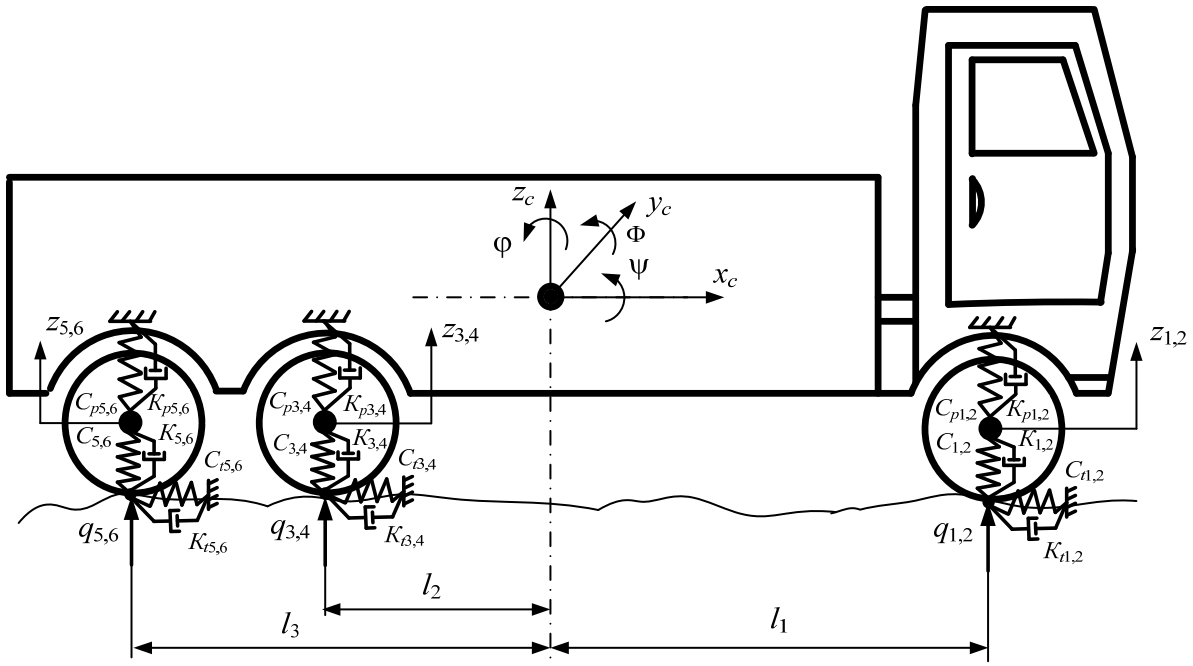


Рис. 2. Расчетная схема вертикальной динамики трехосной колесной машины

Приведенные на рис. 2 обозначения соответствуют упругим и диссипативным характеристикам шин: $C_1 \ldots C_6$ – нормальные жесткости шин; $C_{t1} \ldots C_{t6}$ – тангенциальные жесткости шин; $C_{p1} \ldots C_{p6}$ – жесткости элементов подвески; $k_1 \ldots k_6$ – нормальные демпфирования шин; $k_{t1} \ldots k_{t6}$ – тангенциальные демпфирования шин; $k_{p1} \ldots k_{p6}$ – демпфирования элементов подвески.

В обозначениях параметров и обобщенных координат расчетных схем нечетные индексы относятся к левому борту машины, а четные – к правому.

Приведенная на рис. 1 расчетная схема использовалась для вывода уравнений курсового движения и кинематических связей шин колес с опорной поверхностью, а расчетная схема, представленная на рис. 2, – для вывода уравнений вертикальной динамики и вычисления нормальных реакций опорной поверхности и упругих сил в амортизаторах колесной машины, а также для вывода динамических уравнений продольно- и поперечно-угловых перемещений ее подрессоренной массы.

Для вычисления боковых реакций опорной поверхности на шины колес колесной машины были получены уравнения их кинематических связей с поверхностью дороги, разработанные на основе расчетной схемы ее курсового движения, представленной на рис. 1.

При движении колесной машины по реальным дорогам ее остов совершает продольно-поперечные и вертикальные колебания, в результате чего изменяются сцепления шин ее колес с опорной поверхностью. Указанные сцепления влияют на боковые скольжения шин, особенно при криволинейном движении. Поэтому, как отмечалось выше, для повышения точности имитационного моделирования управляемого курсового движения колесной машины ее математическая модель, кроме уравнений курсового движения, содержит уравнения вертикальной динамики.

Таким образом, разработанная ма-

тематическая модель курсового движения трехосной колесной машины разработана с учетом продольно-поперечных, вертикальных и угловых колебаний ее остова, а также вертикальных колебаний колес.

Технология разработки таких имитационных моделей подробно рассмотрена в [4, 5].

Разработанная имитационная математическая модель курсового движения трехосной колесной машины со всеми управляемыми колесами представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$
\left.
\begin{aligned}
&\ddot{x}_c = \{-\sum_{i=1}^{3}\{Y_i\sin(\varphi+\Theta_i-\delta_i)+(P_{ki}-P_{ti})\cos(\varphi+\Theta_i-\delta_i)\}- \\
&-\sum_{i=5}^{6}\{Y_i\sin(\varphi-\Theta_i+\delta_i)+(P_{ki}-P_{ti})\cos(\varphi-\Theta_i+\delta_i)\}\}/m; \\
&\ddot{y}_c = \{\sum_{i=1}^{3}\{Y_i\cos(\varphi+\Theta_i-\delta_i)+(P_{ki}-P_{ti})\sin(\varphi+\Theta_i-\delta_i)\}+ \\
&+\sum_{i=5}^{6}\{Y_i\cos(\varphi-\Theta_i+\delta_i)+(P_{ki}-P_{ti})\sin(\varphi-\Theta_i+\delta_i)\}\}/m; \\
&\ddot{\varphi} = \sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{2}\{Y_i[l_1\cos(\Theta_i-\delta_i)\mp d_i\sin(\Theta_i-\delta_i)]+ \\
&\quad +(P_{ki}+P_{ti})[l_j\sin(\Theta_i-\delta_i)\pm d_i\cos(\Theta_i-\delta_i)]\}/J_z; \\
&\ddot{z}_c = \sum_{i=1}^{6}P_{ni}/m; \qquad \ddot{z}_i = (P_i-P_{ni})/m_i,\ i=1...6; \\
&\ddot{\psi} = (\sum_{i=1}^{6}\mp P_i d_i - F_c h_c)/j_x; \qquad \ddot{\Phi} = \sum_{i=1}^{3}(P_{i1}l_i+P_{i2}l_i)/J_y; \\
&\dot{\delta}_i\{\dot{x}_c\cos(\varphi+\Theta_i-\delta_i)+\dot{y}_c\sin(\varphi+\Theta_i-\delta_i)+\ddot{\varphi}[l_j\sin(\Theta_i-\delta_i)\mp \\
&\mp d_i\cos(\Theta_i-\delta_i)]\} = \ddot{x}_c\sin(\varphi+\Theta_i-\delta_i)-\ddot{y}_c\cos(\varphi+\Theta_i-\delta_i)- \\
&-\ddot{\varphi}[l_1\cos(\Theta_i-\delta_i)\pm d_i\sin(\Theta_i-\delta_i)]-\dot{\varphi}^2[l_j\sin(\Theta_i-\delta_i)\mp \\
&\mp d_i\cos(\Theta_i-\delta_i)]+(\dot{\varphi}+\dot{\Theta}_i)[\dot{x}_c\cos(\varphi+\Theta_i-\delta_i)+ \\
&+\dot{y}_c\sin(\varphi+\Theta_i-\delta_i)+\ddot{\varphi}[l_1\sin(\Theta_i-\delta_i)\mp d_i\cos(\Theta_i-\delta_i)],\ i=1,\ 6.
\end{aligned}
\right\} \qquad (1)
$$

Индекс j в последнем уравнении системы (1) принимает следующие значения: при $i = 1$ и $i = 2$ индекс $j = 1$; при $i = 3$ и $i = 4$ индекс $j = 2$; при $i = 4$ и $i = 5$ индекс $j = 3$.

Центробежная сила, действующая относительно продольной оси, проходящей через центр масс автомобиля, вычислялась по формуле

$$F_c = mv_c^2 / r_{tr},$$

где v_c, r_{tr} – продольная скорость и радиус криволинейной траектории движения колесной машины.

Приведенная система дифференциальных уравнений (1) объединяет уравнения курсового движения – первое–третье уравнения, вертикальной

динамики – четвертое-пятое; продольно- и поперечно-угловых колебаний подрессоренной массы – шестое и седьмое, а также уравнения кинематических связей шин колес машины с опорной поверхностью – последнее уравнение, используемое для вычисления углов увода шин каждого колеса.

Для вычисления действующих в пятнах контактов шин колес с опорной поверхностью боковых реакций Y_i опорной поверхности, определяющих характер курсового движения колесной машины, использовалась формула

$$Y_i = ku_i\delta_i, \ i = 1...6, \qquad (2)$$

где ku_i – коэффициент сопротивления боковому уводу шины i-го колеса.

Значения коэффициентов ku_i зависят от нормальных и тангенциальных сил, приложенных к колесам, давления воздуха в шинах, характеристик дорожной поверхности и т. д. [1, 3].

При моделировании курсового движения колесной машины на протяжении длительного времени значения коэффициентов ku_i необходимо уточнять на каждом шаге интегрирования уравнений движения.

Полученная математическая модель имитационного движения курсового движения колесной машины разработана для случая отсутствия отрыва шин ее колес от дорожной поверхности и их бокового проскальзывания при движении по криволинейной траектории.

Разработанный алгоритм решения поставленной задачи предусматривает ввод массогеометрических параметров колесной машины, упругодиссипативных характеристик ее элементов и значений начальных условий интегрирования.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) выполнялось с учетом вычисляемых ординат неровностей микропрофиля опорной поверхности, а также задаваемого закона изменения скорости угла поворота рулевого колеса, определяющего траекторию движения колесной машины.

В процессе численного интегрирования уравнений движения колесной машины создается файл результатов моделирования, на основе которого формируются графические зависимости процессов ее управляемого курсового движения.

Файл результатов расчетных исследований представляется в виде строк, в каждой из которых содержатся такие параметры, как время интегрирования, ординаты и скорости изменения неровностей микропрофиля дороги, значения обобщенных координат динамических уравнений и их скоростей, а также значения углов увода шин колес, реакции опорной поверхности на шины колес и другие параметры.

Алгоритм предусматривает также управление продольной скоростью движения колесной машины при выполнении маневров, а также фиксацию момента начала бокового скольжения ее колес, если оно имеет место.

Расчетные исследования проводились на дорогах с различными параметрами микропрофиля на протяжении времени моделирования 400 с и более.

По получаемым результатам строились графические зависимости изменения во времени параметров курсового движения колесной машины, а также круговые траектории перемещения ее центра масс. На рис. 3 приведен вариант результатов имитационного моделирования курсового движения по круговой траектории со скоростью 90 км/ч по горизонтальной дороге со случайным микропрофилем на интервале времени от 0 до 55 с, т. е. зависимости от времени: *1–3* – продольного и поперечного перемещения координат центра масс колесной машины и изменения ее курсового угла; *4–9* – углов поворота управляемых колес; *10–15* – углов увода шин.

Из приведенного рисунка видно, что в течение времени моделирования

колесная машина совершила более двух оборотов (линия *3*) и выдерживала заданную круговую траекторию движения радиусом 5,9 м (см. рис. 3).

Каждый оборот движения совершался за 27,5 с. После совершения каждого оборота значение обобщенной координаты φ обнулялось. Как видно из рис. 3, в процессе моделирования линейные координаты перемещения центра масс колесной машины x_c и y_c описывают синусоиды с периодом 27,5 с. Углы поворота управляемых колес (линии *4–9*) изменялись в соответствии с принятыми законами их изменения, а углы увода шин после входа колесной машины в режим движения по круговой траектории через 6 с стабилизировались (линии *10–15*).

На рис. 4 приведена фазовая траектория движения колесной машины по круговой траектории.

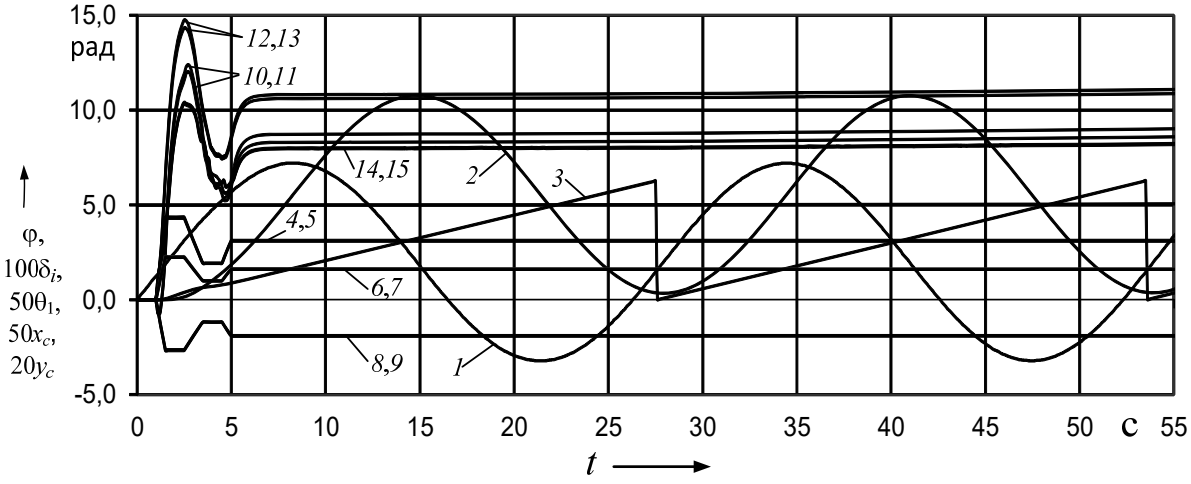


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования управляемого курсового движения колесной машины со скоростью 90 км/ч по круговой траектории

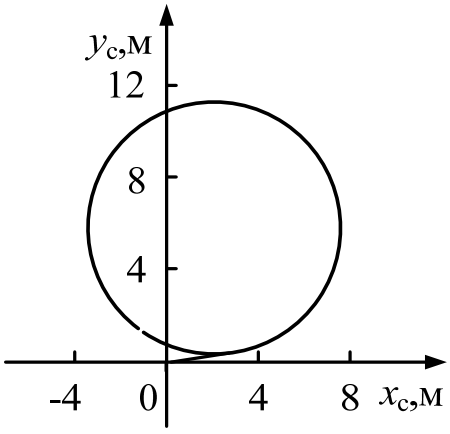


Рис. 4. Фазовая траектория в координатах X0У перемещения центра масс колесной машины при движении ее по кругу

Из приведенного рисунка видно, что движение колесной машины происходило строго по окружности без бокового скольжения шин ее колес.

На рис. 5 приведены фазовые траектории курсового движения центра масс колесной машины в координатах X0У с различными значениями расстояний от передней и средней осей до линии ее мгновенных центров поворота. Из рисунка видно, что с уменьшением расстояния от передней оси l_1 и увеличением его от средней оси l_2 до линии мгновенных центров поворота диаметр траектории движения колесной машины уменьшается. При этом при проведении расчетных экспериментов расстояние ($l_1 + l_2$) между передней и средней осями не изменялось.

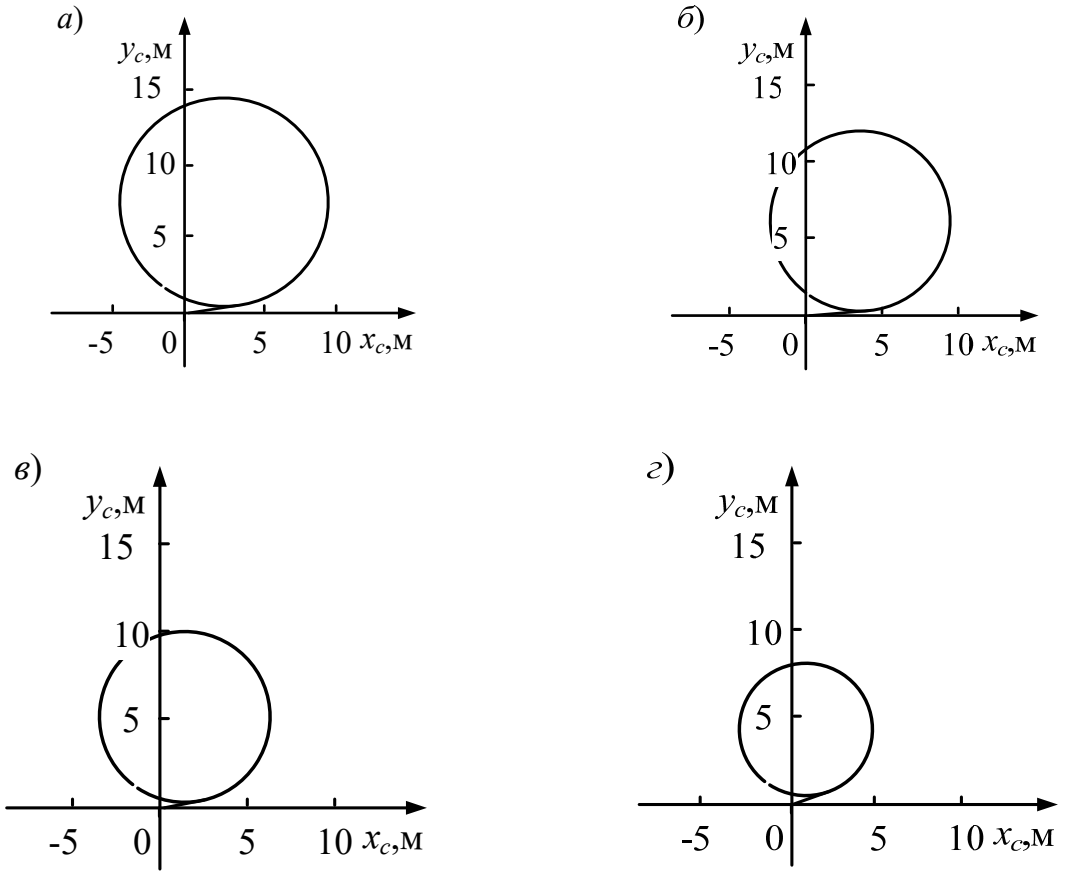


Рис. 5. Фазовые траектории в координатах X0У перемещения центра масс колесной машины при движении ее по кругу при различных значениях расстояний от линии мгновенных центров поворота до передней l_1 и средней l_2 осей: l_1 = 9 м, l_2 = 3 м (*а*); l_1 = 8 м, l_2 = 4 м (*б*); l_1 = 7 м, l_2 = 5 м (*в*); l_1 = 6 м, l_2 = 6 м (*г*)

Как видно из приведенных на рис. 5 траекторий движения, смещение линии мгновенных центров поворота колесной машины к среднему мосту приводит к уменьшению радиуса окружности кругового движения ее центра масс.

Результаты имитационного моделирования вертикальной динамики колесной машины при совершении маневра «Смена полосы движения» на дороге со случайным микропрофилем представлены на рис. 6, на котором отображены графические зависимости от времени следующих ее независимых координат: *1* – вертикальные перемещения центра масс; *2–4* – вертикальные перемещения центров колес левого борта; *5–7* – вертикальные перемещения центров колес правого борта; *8*, *9* – поперечно- и продольно-угловые перемещения подрессоренной массы.

Анализ результатов моделирования (см. рис. 6) показывает, что первую секунду колесная машина, движущаяся со скоростью 72 км/ч, перемещалась прямолинейно по оси 0X. Начиная со второй секунды, она начала поворачиваться против часовой стрелки, выполняя маневр «Смена полосы движения», и вертикальные перемещения центров масс колес ее левого борта перемещались вверх (графики *2–4*), а правого – вниз (графики *5–7*).

На рис. 7 приведена траектория курсового движения колесной машины при совершении маневра «Смена полосы движения».

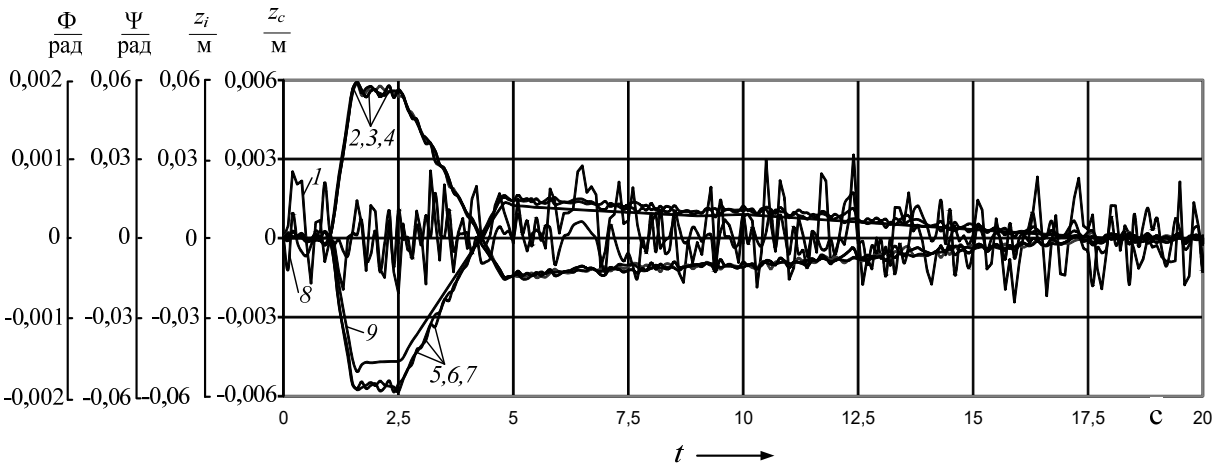


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования вертикальной динамики движения трехосной колесной машины при движении ее по траектории «Смена полосы движения» со скоростью 72 км/ч по дороге со случайным микропрофилем

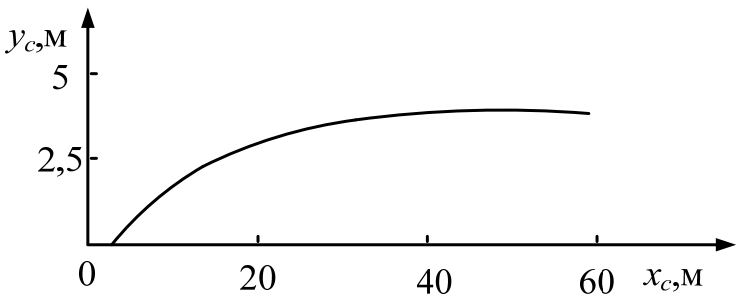


Рис. 7. Траектория движения колесной машины при совершении маневра «Смена полосы движения»

Приведенные на рис. 3–7 результаты имитационного моделирования курсового движения трехосных колесных машин подтверждают работоспособность разработанной математической модели и программного обеспечения, позволяющего моделировать их движение по любым траекториям на дорогах различных категорий.

Выводы

Разработана имитационная математическая модель, которая может эф-

фективно использоваться для оценки влияния положения линии мгновенных центров поворота управляемых колес трехосной колесной машины, ее массогеометрических параметров и упругодиссипативных свойств подвески и шин на курсовую устойчивость и управляемость.

Проведены расчетные исследования и получены достоверные результаты в виде различных траекторий управляемого курсового движения по недеформируемой опорной поверхности со случайным микропрофилем при совершении маневров по круговой траектории и траектории «Смена полосы движения».

Получены результаты, позволяющие оценить влияние расстояний от линии мгновенных центров поворота до передней и средней осей колесной машины на радиус кривизны ее траектории движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антонов, А. А.** Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / А. А. Антонов. – Москва: Машиностроение, 1979. – 216 с.: ил.

2. **Литвинов, А. С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – Москва: Машиностроение, 1971. – 416 с.: ил.

3. Динамика колесных машин : монография / И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – 462 с.: ил.

4. **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.

5. **Ясюкович, Э. И.** Разработка методики виртуальных испытаний курсовой устойчивости трехосных автомобилей / Э. И. Ясюкович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 59–69.

Статья сдана в редакцию 15 января 2024 года

Контакты:
ed50m@mail.ru (Ясюкович Эдвард Игнатьевич).

E. I. YASYUKOVICH

SIMULATION MODELING OF STEERABLE DIRECTIONAL MOVEMENT OF THREE-AXLE WHEELED VEHICLES

Abstract

A simulation mathematical model for the directional movement of a three-axle wheeled vehicle with regard to vertical dynamics has been developed, as well as software evaluating how the position of the line of instantaneous centers of rotation of vehicles' steered wheels affects vehicle directional stability and steerability.

Keywords:

three-axle wheeled vehicle, simulation mathematical model, line of instantaneous centers of rotation of steered wheels, vertical dynamics, directional stability, steerability.

For citation:

Yasyukovich, E. I. Simulation modeling of steerable directional movement of three-axle wheeled vehicles / E. I. Yasyukovich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 68–76.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-77-86

УДК 621.365:66

Т. С. ЛАРЬКИНА
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь);
Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ КОСВЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЖИДКОСТИ КАК ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕМНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ

Аннотация

Рассмотрены особенности идентификации параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости как объекта с распределенными объемными параметрами и неопределенностями. Одной из значимых проблем вышеуказанной системы считаются способности приспособления к нагрузке, а также адаптивный контроль температуры для рабочей среды и проводящих материалов. Для разрешения рассматриваемых проблем применяют наблюдатели состояния, в частности параметрический идентификатор. Данные элементы являются значимым элементом для управления динамическими системами. В ходе исследования применены MATLAB, COMSOL Multiphysics, ANSYS, КОМПАС-3D.

Ключевые слова:

индукционный нагрев, установка для термической обработки продуктов питания, идентификатор, наблюдатель состояния, распределенные параметры, неопределенность.

Для цитирования:

Ларькина, Т. С. Особенности идентификации параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости как объекта с распределенными объемными параметрами и неопределенностями / Т. С. Ларькина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 77–86.

Введение

Идентификация параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости представляет собой задачу детерминирования значений этих параметров на основе доступных сведений и исследований, что дает возможность в обеспечении более точных и реалистичных математических моделей, которые в свою очередь могут помочь повысить управление и оптимизацию системы нагрева в целом.

Далее будут рассмотрены признаки и методы идентификации параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами и неопределенностями, а также примеры исследований и применений с выявлением перспективы идентификации параметров в данной области. Представленное исследование позволит лучше понять сложности и потенциал данного подхода, а также его применимость в промышленных и научных приложениях.

Распределенные объемные параметры системы косвенного индукционного нагрева жидкости

В системах косвенного индукционного нагрева жидкости параметры, влияющие на процесс нагрева, могут

© Ларькина Т. С., 2024

иметь распределенный характер и изменяться по объему системы. Эти распределенные объемные параметры включают следующее: теплопроводность; теплоемкость; плотность материала (рис. 1) [1].

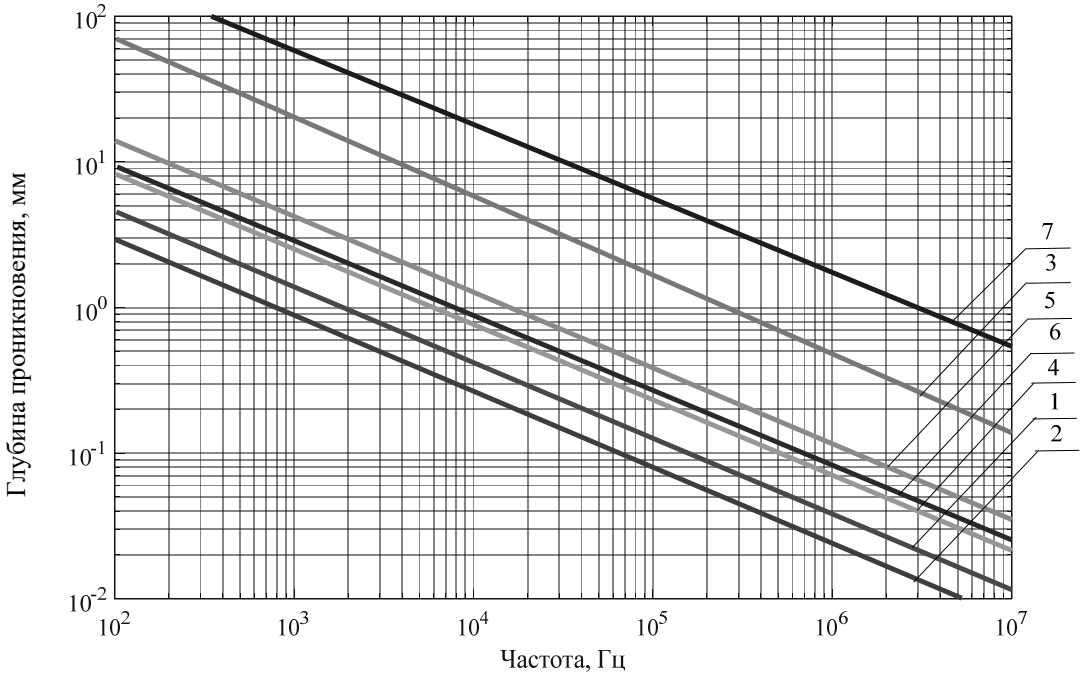


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения от частоты и свойств материалов (выполнено в среде MATLAB): 1 – сталь (μ = 40 Гн/м); 2 – сталь (μ = 100 Гн/м); 3 – сталь (μ = 1 Гн/м, 800 °С); 4 – медь (μ = 0,99 Гн/м); 5 – медь (800 °С); 6 – алюминий (μ = 1 Гн/м); 7 – графит (μ = 1 Гн/м)

Влияние параметров на процесс нагрева и эффективность системы

Распределенные объемные параметры системы косвенного индукционного нагрева жидкости напрямую влияют на процесс нагрева и эффективность системы (рис. 2) [1].

Одной из проблем системы косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами и неопределенностями являются возможности адаптации к нагрузке и адаптивный контроль температуры как рабочей среды, так и проводящих материалов.

Релевантная неизвестная информация о сложной технической системе может быть восстановлена в режиме онлайн из входных и выходных данных и динамики состояний объекта.

Методы определения и идентификации распределенных объемных параметров

На рис. 3 представлена систематизация методов управления системой косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами и неопределенностями [2, 3].

В процессе идентификации параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами необходимо применять специальные методы и техники. Некоторые из них включают:

– методы обратной задачи;

– методы на основе итераций;

– методы на основе моделирования;

– байесовский подход.

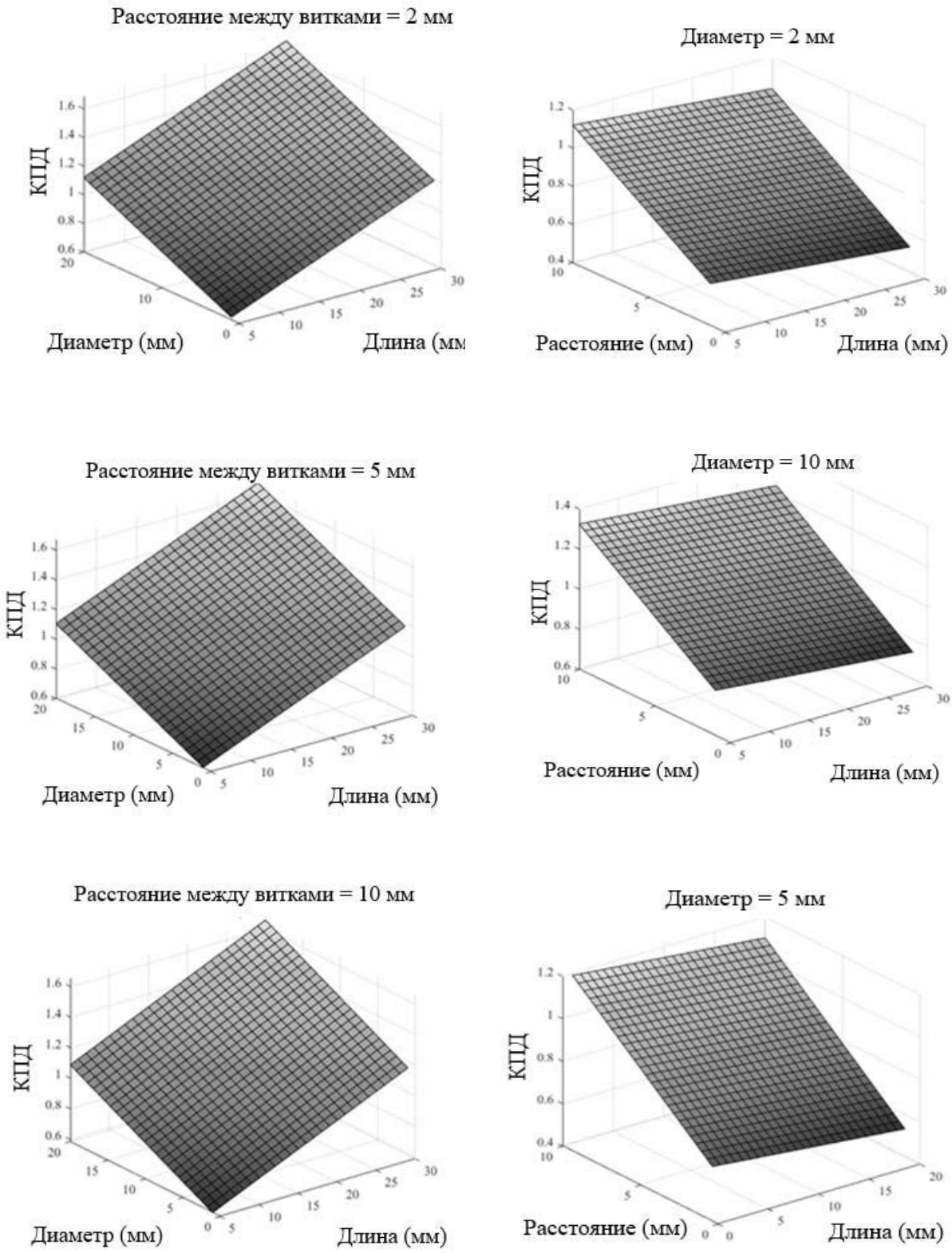


Рис. 2. Зависимости КПД от геометрических параметров индуктора

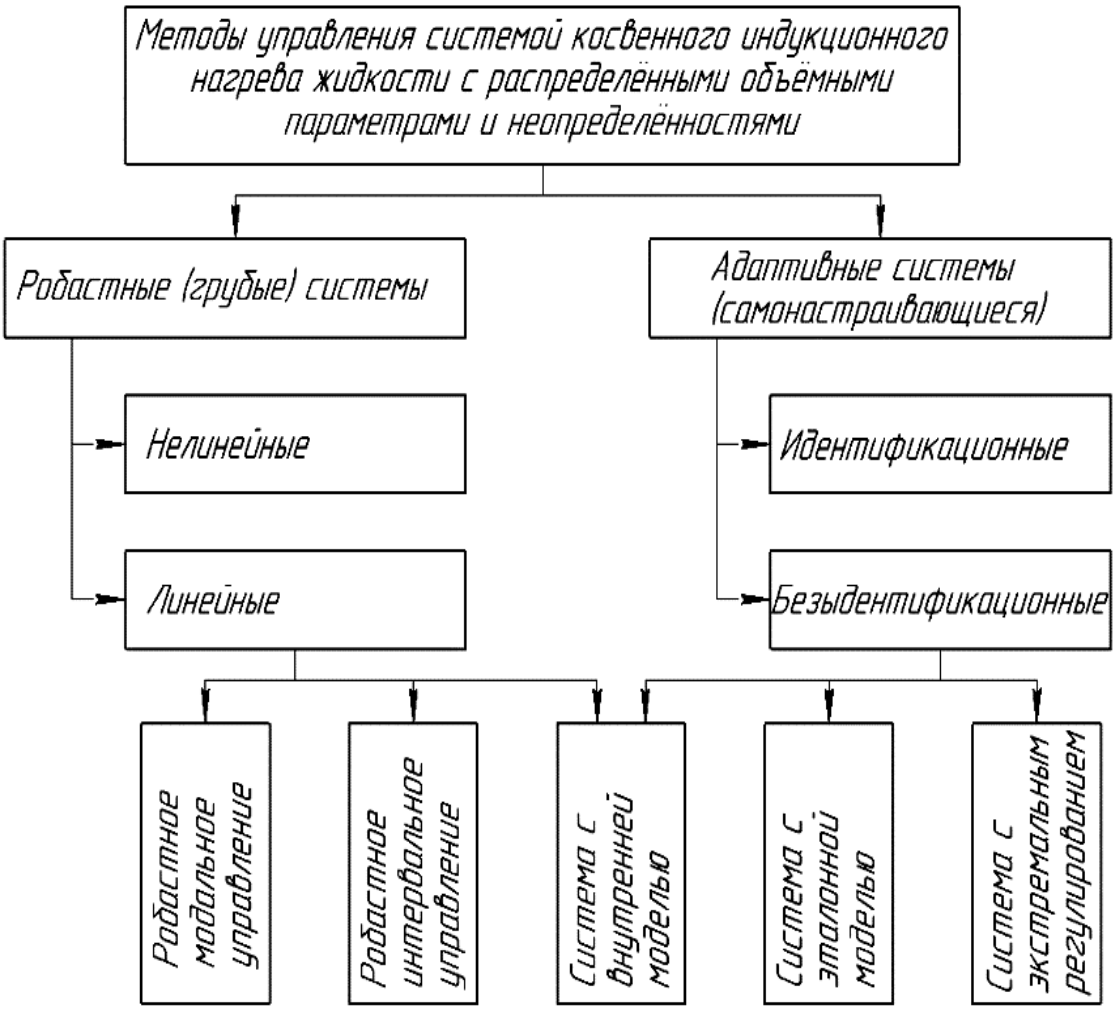


Рис. 3. Систематизация методов управления

Наиболее полно идентифицируемый объект (система косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами и неопределенностями) описывается в терминах пространства состояний.

Взаимосвязь между идентификатором и системой управления комплексом косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами и неопределенностями приведена на рис. 4 [4].

Математическое описание данной системы можно представить следующим образом [5–8]:

$$u_{И}(t) = i_{И}R_{И} + L_{И}\frac{di_{И}}{dt} + W_{И}\frac{d\Phi}{dt}; \quad (1)$$

$$0 = i_{ВТ}R_{ВТ} + W_{ВТ}\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где $R_{ВТ}$ – функция частоты, тока индуктора.

Баланс мощности будет представлен как

$$(i^2{}_{ВТ}R_{ВТ} + i^2{}_{И}R_{И})dt = cmdQ + AdQ. \quad (3)$$

После преобразований полные потери примут следующий вид:

$$i^2{}_{ВТ}R_{ВТ} + i^2{}_{И}R_{И} = \Delta P. \quad (4)$$

Величина, которая характеризует передачу энергии в жидкость,

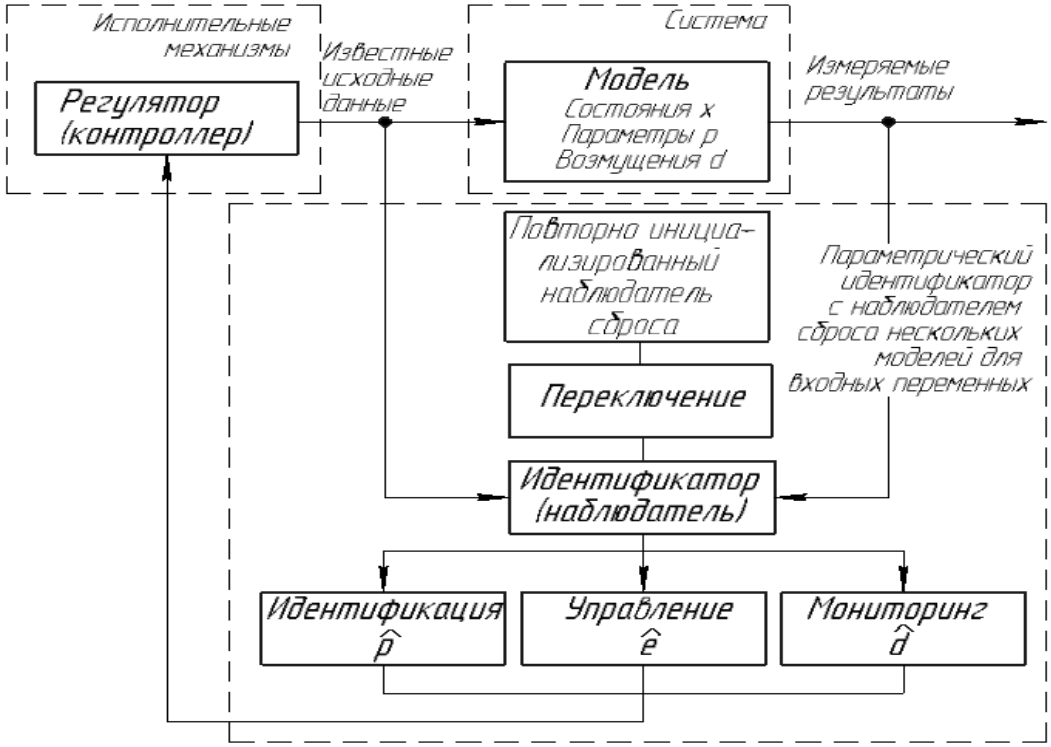
$$\Delta P_{ВТ}(t) = cm\frac{dQ_{ВТ}}{2} + AadQ_{ВТ}. \quad (5)$$

Описание тепловых процессов в комплексе косвенного индукционного нагрева жидкости можно представить как

$$P_И dt = c_И m_И d\theta_И + h_{И.СТ}(\theta_И - \theta_{СТ})dt, \quad (6)$$

где $h_{И.СТ}$ – коэффициент Нуссельта (Nu); θ – перегрев.

а)



б)

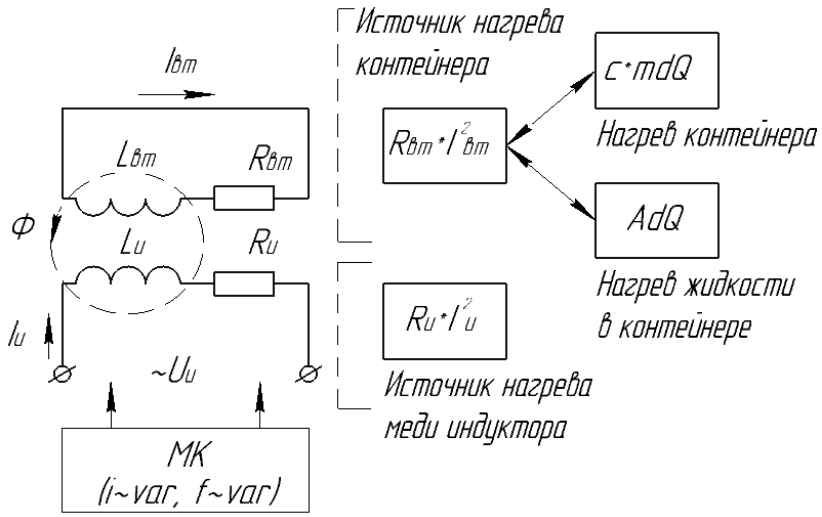


Рис. 4. Взаимосвязь между идентификатором и системой управления комплексом косвенного индукционного нагрева жидкости с распределенными объемными параметрами и неопределенностями (*а*); схема для исследования и определения параметров опосредованного локализованного нагрева жидкости (*б*)

Вектор состояния

$$\begin{cases} \dfrac{di_И}{dt} = \left(-\dfrac{\left(R_И\left(1+a\theta_И\right)+\dfrac{w_И}{w_{BT}}R_{BT}\right)}{L_И} \right) \times \\ \times i_И + \dfrac{w_И}{w_{BT}}\dfrac{R_{BT}}{L_Ф L_И}\Phi + \left(-\dfrac{1}{L_И} \right) u_И; \\ \dfrac{d\Phi}{dt} = \dfrac{R_{BT}}{w_{BT}} i_И + \left(-\dfrac{R_{BT}}{L_Ф} w_{BT} \right) \Phi. \end{cases} \quad (7)$$

В итоге функция Ляпунова примет вид

$$V = \varepsilon^T \cdot H \cdot \varepsilon + \frac{\delta^2}{\lambda_1} + \frac{p^2}{\lambda_2}; \quad (8)$$

$$\lambda_1, \lambda_2 = \text{const} > 0;$$

$$H = \begin{bmatrix} h_2^1 & 0 \\ 0 & h_2^2 \end{bmatrix}.$$

На рис. 5 приведен пример непрерывной модели нагрева.

На рис. 6 приведен пример модели идентификатора параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости как объекта с распределенными объемными параметрами и неопределенностями [9].

Полученные уравнения определяет закон идентификации параметров температуры жидкости и сопротивления контура вихревых токов (рис. 7–11).

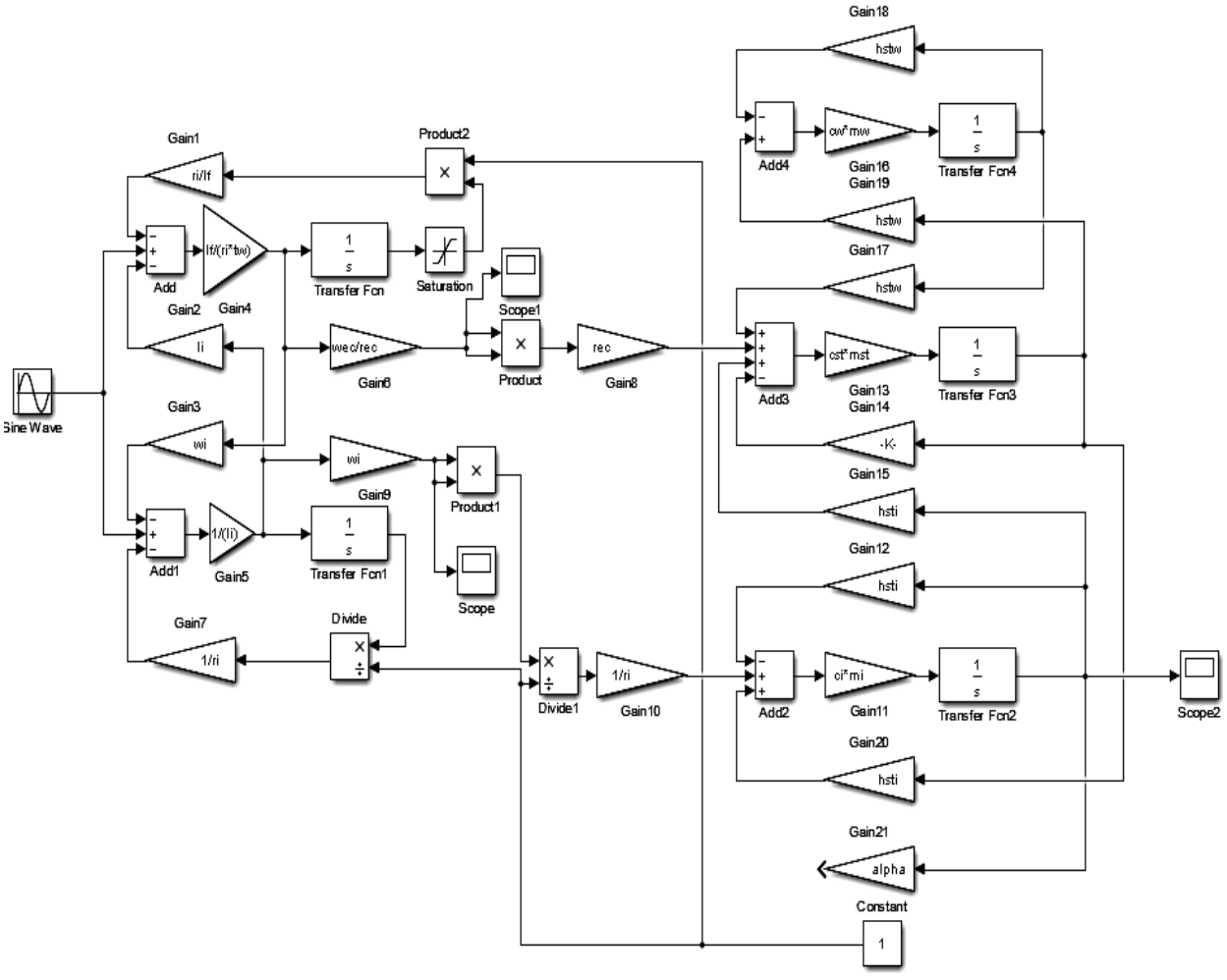


Рис. 5. Пример непрерывной модели нагрева

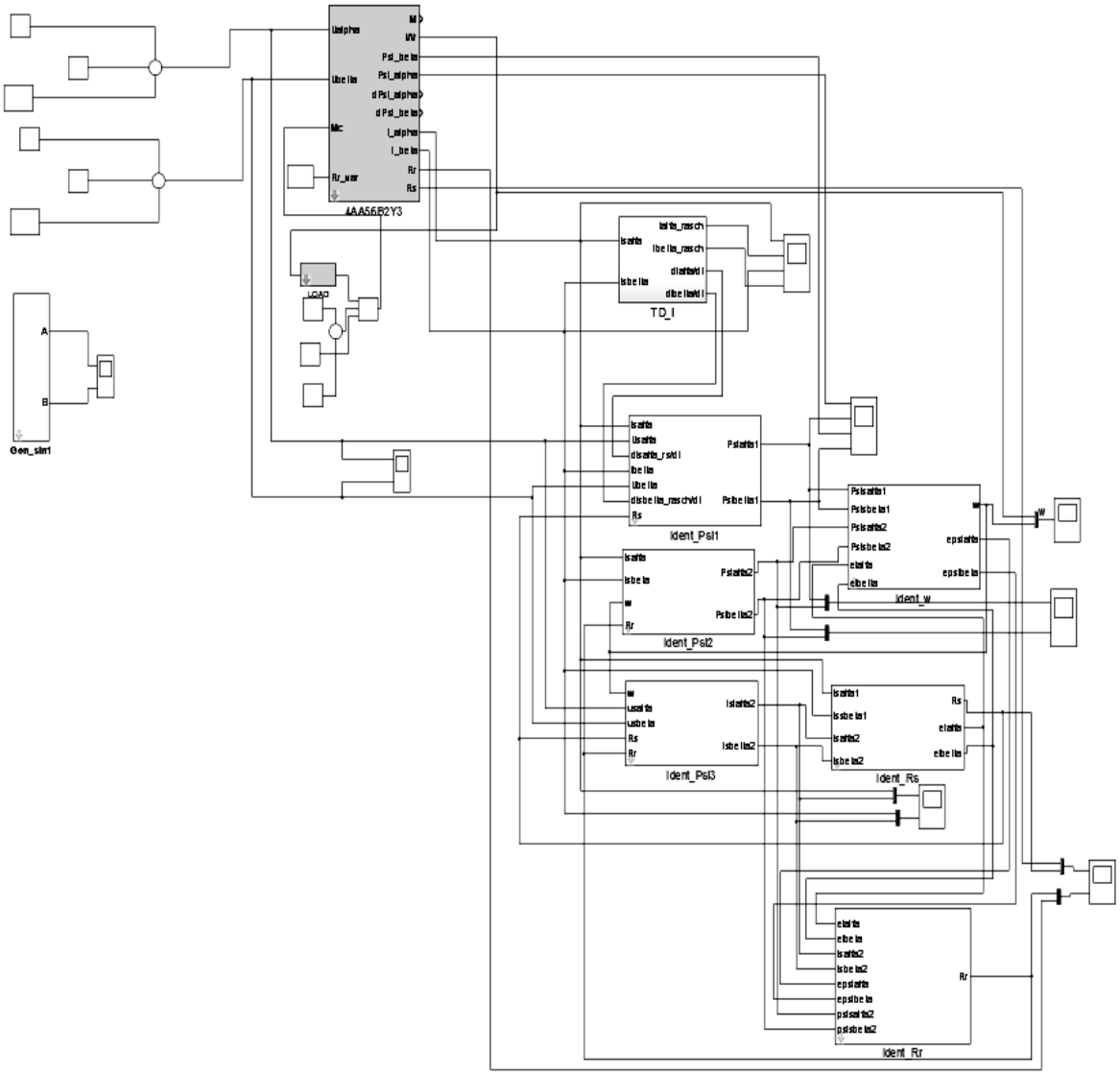


Рис. 6. Пример модели идентификатора параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости как объекта с распределенными объемными параметрами и неопределенностями

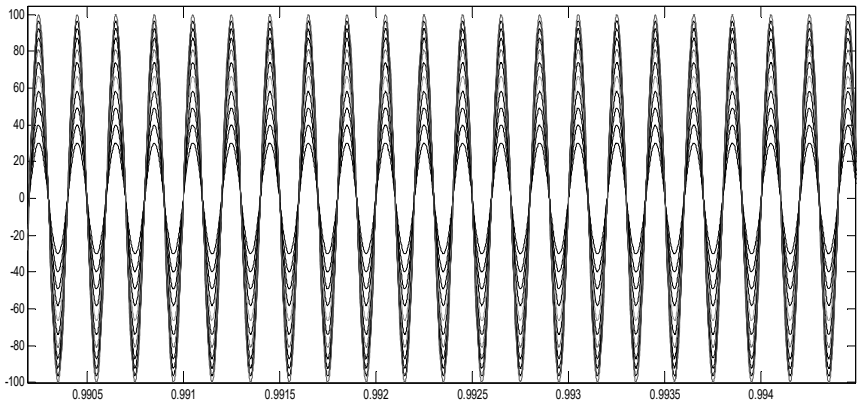


Рис. 7. Изменение выходной величины системы (в данном случае $U = f(t)$)

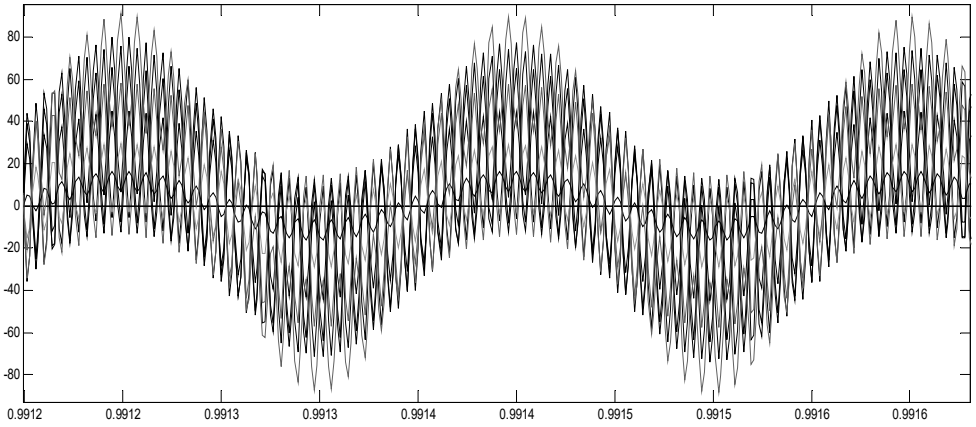


Рис. 8. Изменение выходной величины системы (в данном случае $U = f(t)$)

а) *б*)

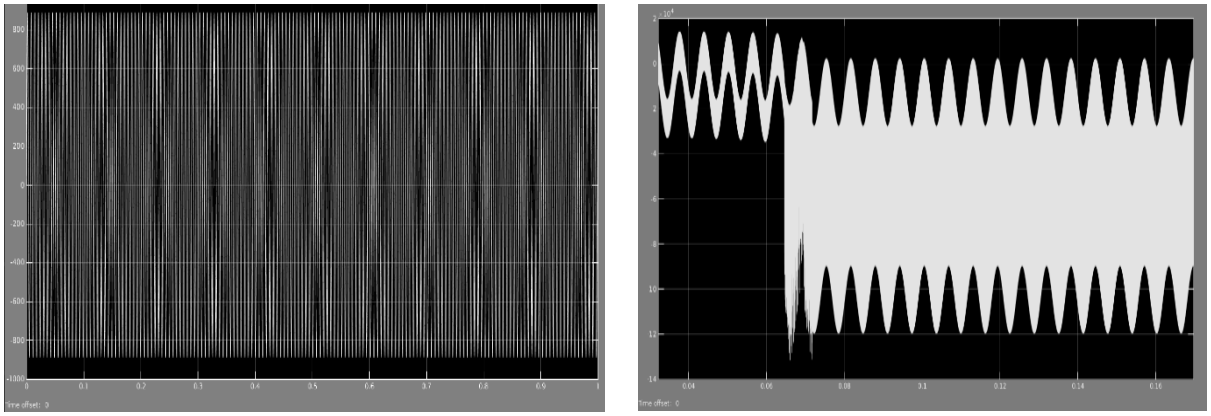


Рис. 9. Результаты моделирования непрерывной модели нагрева: *а* – вихревые токи; *б* – токи индуктора

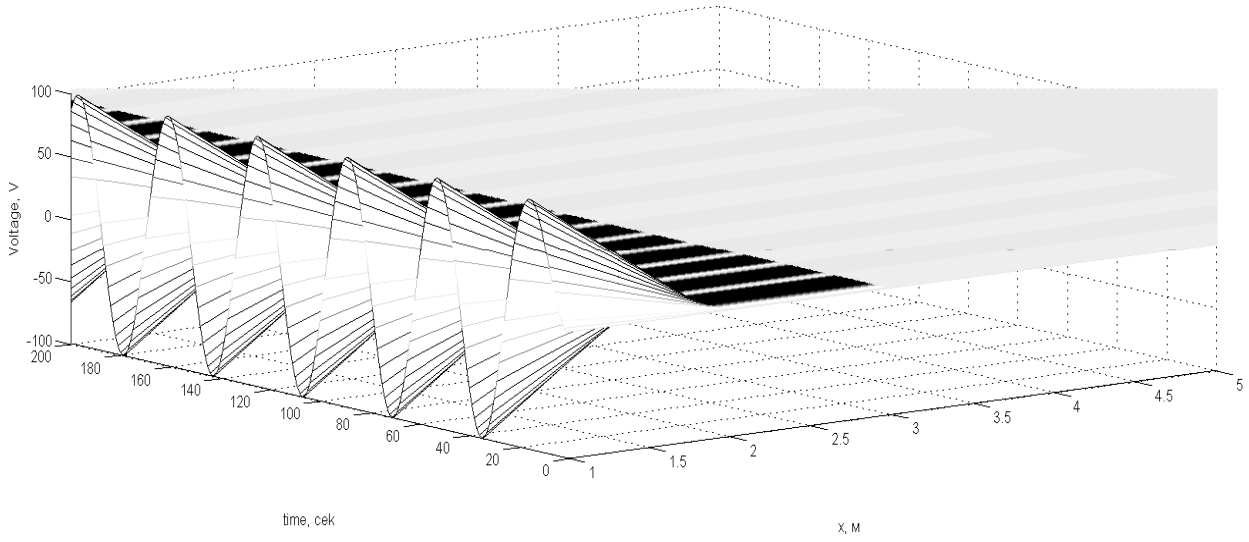


Рис. 10. Результаты моделирования (идентификатор)

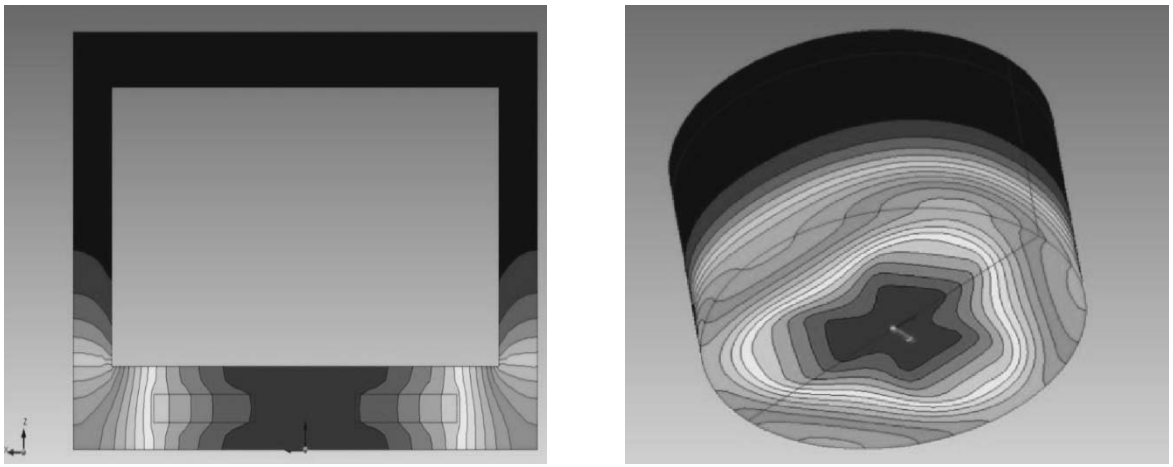


Рис. 11. Тепловое поле (частный случай)

Представленные результаты исследования верифицируют теоретические расчеты. Программное обеспечение, разработанное для решения задачи идентификации процесса индукционного нагрева жидкой среды, позволяет предсказывать температурное поле и распределение тепловых потоков внутри нагреваемой жидкости. Это имеет большое значение для оптимизации и контроля процесса нагрева, обеспечивая достижение требуемых результатов и эффективное использование ресурсов.

Выводы

Создание программного обеспечения для постановления проблемы идентификации хода индуктивного нагрева жидкостей среды обладает огромной значимостью с целью технической практики, а также академических анализов в этой сфере. Именно она содействует формированию, а также совершенствованию технологий нагрева путем обеспечения наилучшего применения энергии, а также увеличению производительности систем в целом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ларькина, Т. С.** Математическое моделирование и программное обеспечение для решения задачи идентификации процесса индукционного нагрева жидкой среды / Т. С. Ларькина // Вестн. Вологод. гос. ун-та. Сер. Технические науки. – 2023. – № 3 (21). – С. 32–35.

2. **Льготчиков, В. В.** Алгоритм идентификации параметров устройства для нагрева жидкости / В. В. Льготчиков, Т. С. Ларькина // Программные продукты и системы. Software & Systems. – 2019. – № 4 (32). – С. 735–743.

3. **Льготчиков, В. В.** Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями / В. В. Льготчиков, Т. С. Ларькина // Вестн. Москов. энергет. ин-та. – 2019. – № 5. – С. 73–80.

4. **Льготчиков, В. В.** Проектирование индукционного устройства для нагрева жидкой среды / В. В. Льготчиков, Т. С. Ларькина // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 87–104.

5. The domestic induction heating appliance: An overview of recent research / J. Acero [et al.] // In Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2008. – P. 651–657.

6. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении: учебное пособие для высших учебных заведений / А. А. Бобцов [и др.]. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 277 с.: ил.

7. **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.: ил.

8. **Кирилин, В. А.** Техническая термодинамика / В. А. Кирилин, В. В. Сычев, А. Е. Шейдулин. – Москва: МЭИ, 2008. – 502 с.

9. **Краснова, С. А.** Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем / С. А. Краснова, В. А. Уткин. – Москва: Наука, 2006. – 272 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 8 декабря 2023 года

Контакты:
tatyana.larkina.2015@yandex.ru (Ларькина Татьяна Сергеевна).

T. S. LARKINA

FEATURES OF IDENTIFYING PARAMETERS OF A SYSTEM FOR INDIRECT INDUCTION HEATING OF A LIQUID AS AN OBJECT WITH DISTRIBUTED VOLUME PARAMETERS AND UNCERTAINTIES

Abstract

The article discusses the features of identifying parameters of a system for indirect induction heating of a liquid as an object with distributed volumetric parameters and uncertainties. One of the significant problems of the systems under consideration is the ability to adapt to the load, as well as the adaptive temperature control for the working environment and conductive materials. To resolve the above problems, state observers are used, in particular, a parametric identifier. These elements are a significant element for managing dynamic systems. MATLAB, COMSOL Multiphysics, ANSYS, KOMPAS-3D were used in this study.

Keywords:

induction heating, installation for thermal processing of food products, identifier, state observer, distributed parameters, uncertainty.

For citation:

Larkina, T. S. Features of identifying parameters of a system for indirect induction heating of a liquid as an object with distributed volume parameters and uncertainties / T. S. Larkina // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 77–86.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-87-98

УДК 620.179.14

В. Г. ПАНТЮШИНА
В. А. НОВИКОВ, *д-р техн. наук*, *проф.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

АНАЛИЗ СПОСОБОВ МАГНИТОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация

Произведен анализ способов магнитографического контроля ферромагнитных объектов. Установлено, что повышение достоверности контроля может быть достигнуто: исключением из рассмотрения областей соединения, в которых дефект обнаруживается неоднозначно с возможностью занижения величины; реализацией принципа раздельного контроля швов на наличие дефектов разного вида; отстройкой от помех; исключением размагничивающего действия выпуклости шва; повышением точности определения координат расположения и размеров дефектов и т. д. Обобщены и систематизированы технические решения, что позволит разработать универсальную методику магнитографического контроля ферромагнитных объектов.

Ключевые слова:

магнитографический метод, способы контроля, достоверность, ферромагнитные объекты, дефектоскопия, анализ.

Для цитирования:

Пантюшина, В. Г. Анализ способов магнитографического контроля ферромагнитных объектов / В. Г. Пантюшина, В. А. Новиков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 87–98.

Введение

Магнитографический метод контроля включает следующие технологические операции. На поверхность контролируемого ферромагнитного объекта укладывают магнитную ленту, намагничивают его вместе с лентой постоянным или импульсным полем, при этом в местах дефектов сплошности над поверхностью объекта возникают магнитные поля рассеяния, которые записываются на ленту. Затем запись с ленты считывают с помощью дефектоскопа, наблюдают на экране прибора сигналограмму или регистрограмму, если у прибора нет электронно-лучевой трубки, по виду которых судят о наличии дефектов в объекте [1]. Метод контроля после изобретения получил широкое распространение и был значительно усовершенствован. К сожалению, эти разработки не нашли отражения в нормативных документах и новых методиках контроля. По этой причине разработка универсальной методики магнитографического контроля, с учетом эффективных способов и средств, является важной и актуальной задачей.

Основная часть

Анализ литературных источников и систематизация его результатов по теме «Способы магнитографического контроля» показал, что практически все

© Пантюшина В. Г., Новиков В. А., 2024

способы позволяют повысить достоверность контроля или его производительность. Проанализируем, за счет чего достигнуто повышение достоверности контроля.

Поверхностные трещины микроскопического раскрытия при намагничивании ферромагнитного объекта вместе с уложенной на его поверхность магнитной лентой создают на ленте узколокальные магнитные отпечатки. При считывании записи с ленты поля таких магнитных отпечатков замыкаются в рабочем зазоре индукционной головки дефектоскопа, а не через ее сердечник. По этой причине на экране дефектоскопа не наблюдается характерный электрический импульс, который говорит о наличии дефекта. То есть такой дефект не обнаруживается. Повышение чувствительности достигается за счет создания на магнитной ленте более широкого магнитного отпечатка полем такого дефекта путем перемещения со скольжением магнитной ленты по поверхности объекта при его намагничивании постоянным полем перпендикулярно направлению распространения дефекта [2].

Однако способ магнитографического контроля с записью полей рассеяния дефектов на скользящий магнитный носитель не позволяет точно определить место расположения дефекта, т. к. ширина магнитного отпечатка на ленте, вызванного полем дефекта, зависит от глубины залегания дефекта и его величины. Чтобы определить место расположения дефекта в объекте, в [3] предлагают переместить магнитную ленту на расстояние l, а затем на $2l$ в противоположном направлении, а положение проекции дефекта на ленте определять как среднюю точку полученного магнитного рельефа на ленте либо записывать поля дефектов на две соприкасающиеся магнитные ленты при их одновременном перемещении в противоположных направлениях с последующим считыванием записи одновременно с обеих лент [4]. Повышение точности определения места расположения дефекта в объекте объясняется тем, что на магнитной ленте образуется симметричный относительно первоначального положения проекции дефекта на ленте магнитный отпечаток. Тогда средняя точка этого рельефа будет соответствовать проекции дефекта на магнитную ленту в первоначальном положении.

Тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта с увеличением глубины залегания дефекта претерпевает не только количественные, но и качественные изменения. Начиная с некоторой глубины залегания дефекта $H_{\tau d}$ из колоколообразной трансформируется в двугорбую кривую, максимумы которой смещаются к краям валика шва. Это обусловливает появление в шве областей качественно разной выявляемости дефектов (рис. 1). В сварном шве определены области, в которых дефекты обнаруживаются: однозначно с возможностью завышения величины Iа, неоднозначно с возможностью завышения величины Iб; неоднозначно с возможностью занижения величины II, III, IV, V, что может привести в первом и втором случаях к перебраковке, а в последнем – к недобраковке изделий [5].

Чтобы исключить недобраковку изделий вследствие неоднозначности обнаружения дефектов, построены номограммы, позволяющие по известным параметрам выпуклости шва (ширине и высоте) определить толщину, при которой в зоне контроля будут находиться только области Iа и Iб [5]. То есть за счет исключения зон контроля, в которых дефекты обнаруживаются неоднозначно с возможностью занижения величины вследствие делокализации суперпозиции тангенциальных составляющих внешнего поля и поля дефекта на поверхности сварного соединения.

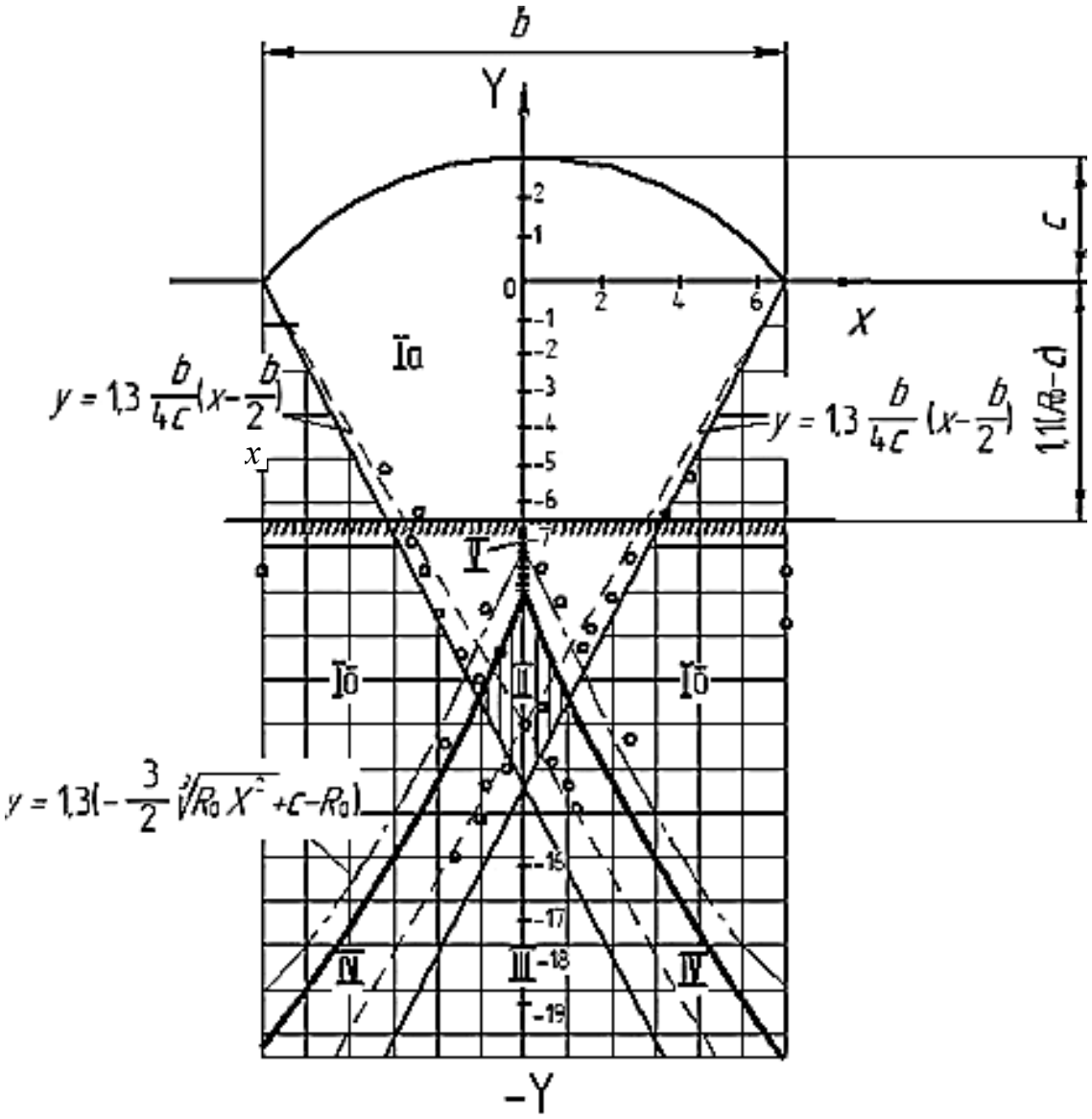


Рис. 1. Области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении

Эта особенность формирования полей дефектов использована в [6] для разработки способа намагничивания при контроле односторонних сварных соединений. Сущность способа состоит в следующем. На поверхность контролируемого образца с обратной стороны шва укладывают пластину прямоугольного сечения, а затем две пластины со скосом кромки, стык которых расположен в плоскости симметрии шва. Толщину пластины прямоугольного сечения выбирают такой, чтобы стык пластин со скосом кромки находился в области III (или II). В этом случае «ложный» сигнал от стыка на сигнало-грамме либо будет отсутствовать, либо такие сигналы не будут превышать фон помех. Итак, стык пластин со скосом кромки создает дополнительное поле, которое сильно подмагничивает шов, однако сам стык как дефект не обнаруживается. Дефекты же сплошности сварного соединения располагаются ближе к поверхности сильно намагниченного шва (области Iа или Iб), а по-

тому будут создавать значительные поля рассеяния и могут быть уверенно обнаружены.

Второй путь создания более высокой магнитной индукции в шве заключается в использовании концентраторов магнитной индукции в различном исполнении (две пластины прямоугольного сечения, изготовленные из магнитомягкого материала, прикрепленные к полюсам намагничивающего устройства), которые позволяют создать в зоне шва поле высокой напряженности [6–11].

Одним из способов повышения чувствительности контроля является предварительное намагничивание изделия не менее чем десятью импульсами поля напряженностью $4H_c \le H \le 4H_c + (40-50)$ А/см, где H – амплитуда напряженности поля каждого импульса, А/см; H_c – коэрцитивная сила контролируемого материала, А/см [12]. При этом индукция в контролируемом сечении возрастает по несимметричным петлям гистерезиса, достигая после 10 импульсов установившегося цикла. После отключения намагничивающего устройства на контролируемую поверхность укладывают магнитоноситель и увеличивают напряженность намагничивающего поля до заданной величины. Магнитоноситель в этом случае намагничивается по кривой первоначального намагничивания, не достигая намагниченности насыщения и сохраняя способность записывать поля рассеяния дефектов. Способ позволяет без намагничивания магнитоносителя до насыщения достичь заданного уровня индукции в контролируемом сечении при невысокой напряженности намагничивающего поля и тем самым обеспечить высокую чувствительность контроля.

Для получения более точной информации о внутренних дефектах, которые создают при поперечном намагничивании шва поле рассеяния, совпадающее с краем шва, в [13] предложено после намагничивания объекта контроля постоянным магнитным полем (при этом на ленту записываются как полезные поля, так и поля-помехи) произвести повторное его намагничивание (и ленты, уложенной на его поверхность) полем, не проникающим глубоко в металл объекта. Направление внешнего поля при повторном намагничивании противоположно первоначальному, а его величина выбирается такой, чтобы компенсировать помехи вследствие наложения их полей. Основной недостаток способа состоит в том, что при контроле теряется информация о поверхностных дефектах. Поэтому предлагается контроль производить дважды (один раз – традиционным способом).

В [14] магнитную ленту предварительно намагничивают в поперечном направлении до состояния насыщения. Перед укладкой ленты на изделие на нее воздействуют полем заданной напряженности $H_з$, равным сумме поля рабочей напряженности H_p и поля рассеяния от наибольших допустимых дефектов H_{nd}, направление которого противоположно полю поляризации, укладывают ее на контролируемое изделие, намагничивают изделие совместно с магнитной лентой полем рабочей напряженности H_p в направлении поля заданной напряженности, а по считанному с магнитограммы сигналу определяют качество изделия. Контраст записи полей-помех $H_n \le H_{nd}$ равен нулю (рис. 2).

Для повышения чувствительности контроля изделий, когда амплитуда полезного сигнала незначительно превышает амплитуду сигнала от наибольшего допустимого дефекта, а фон помех меньше сигналов от наибольшего допустимого дефекта, в [15] предложен следующий способ. Перед оценкой качества изделия по магнитограмме ленту намагничивают по участкам с равными по амплитуде помехами дополнительным полем. Его направление

совпадает с направлением поля рабочей напряженности, а величина меньше суммы поля рабочей напряженности и поля от наибольшего допустимого дефекта (рис. 3).

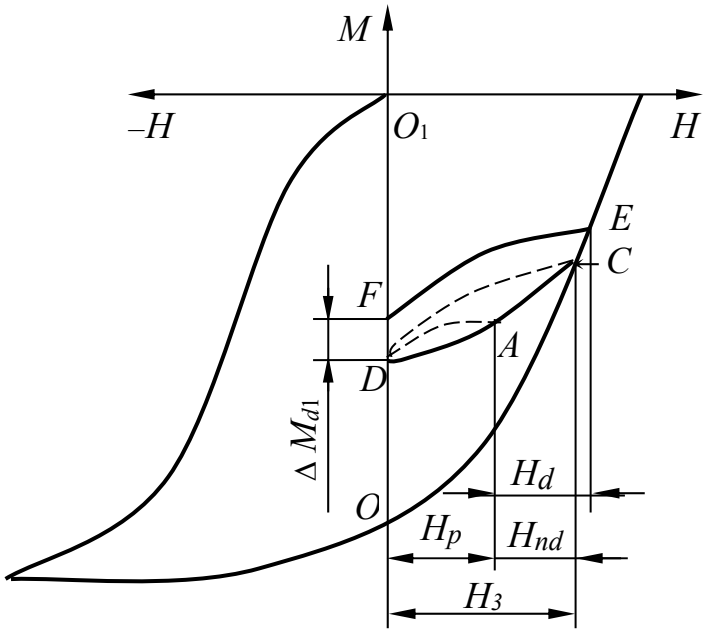


Рис. 2. К пояснению способов отстройки от помех при магнитографическом контроле с подмагничиванием ленты до записи полей рассеяния дефектов

Принцип раздельного контроля сварных швов позволяет учесть как конструктивно-технологические особенности шва, так и вид и тип дефекта, его ориентацию в объекте [5]. Так, при обнаружении протяженных дефектов, ориентированных вдоль шва, целесообразно сварной шов намагничивать в поперечном направлении, используя при неблагоприятных размерах выпуклости шва (отношение ширины шва к высоте выпуклости больше 7) концентраторы магнитной индукции, при обнаружении компактных – вдоль шва, считывая запись с ленты вдоль направления ее остаточной намагниченности, разноориентированных дефектов – поворачивая намагничивающее устройство на угол ±45° в процессе его перемещения вдоль шва [5, 9, 16, 17].

Магнитные поля рассеяния компактных дефектов при режимах намагничивания, характерных для магнитного контроля, вытягиваются в направлении, перпендикулярном вектору напряженности намагничивающего поля. Поэтому если объект контроля намагнитить вдоль направления распространения цепочки несплошностей, то поля компактных дефектов будут ориентироваться поперек цепочки и станут перекрываться при меньшем расстоянии между дефектами по сравнению со случаем намагничивания объекта поперек цепочки несплошностей. При этом разрешающая способность метода увеличивается от 10 до 40 раз и зависит от глубины залегания дефектов [17].

Повысить чувствительность метода контроля при обнаружении одиночных компактных дефектов в шве можно за счет исключения размагничивающего действия выпуклости шва [17]. С этой целью шов намагничивают в продоль-

ном направлении, а магнитную ленту считывают вдоль направления ее остаточной намагниченности.

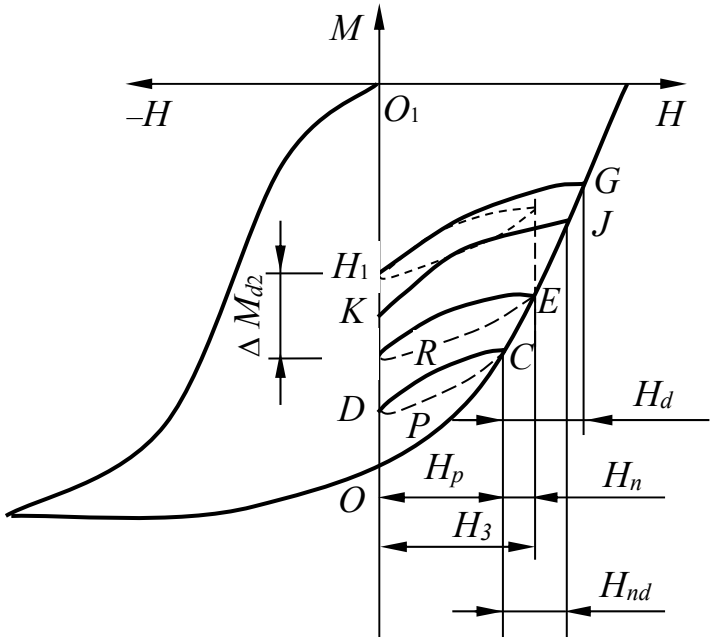


Рис. 3. К пояснению способов отстройки от помех при магнитографическом контроле с подмагничиванием ленты после записи полей рассеяния дефектов

При намагничивании сварного шва конечной длины в продольном направлении компактные дефекты сплошности, находящиеся у начала или конца шва, будут обнаруживаться неудовлетворительно, т. к. резко увеличивается магнитное сопротивление цепи «сердечник П-образного электромагнита – объект контроля – воздушный промежуток». В [18] предлагается пристыковывать к объекту технологические пластины такой же толщины, что и объект контроля, выполненные из того же материала. Повышение чувствительности будет происходить благодаря увеличению магнитной индукции вследствие уменьшения магнитного сопротивления начального и конечного участков шва.

В [19] рекомендуют при контроле использовать магнитную ленту такого типа, чтобы рабочая точка ее характеристики совпадала с коэрцитивной силой ленты. Тогда запись полей дефектов будет происходить на крутом линейном участке ее характеристики. Однако тангенциальная составляющая полей поверхностных дефектов имеет вид ярко выраженного остроконечного импульса с двумя отрицательными полуволнами значительной амплитуды. Повысить чувствительность контроля при обнаружении таких дефектов можно за счет выбора магнитной ленты такого типа, чтобы рабочая точка ее характеристики при намагничивании объекта с уложенной на его поверхность лентой полем рабочей напряженности была на 20...70 А/см больше ее коэрцитивной силы. В этом случае запись отрицательных полуволн полей дефектов будет происходить на более крутом участке характеристики магнитной ленты [20].

Для расширения рабочего диапа-

зона характеристики магнитоносителя, увеличения амплитуды сигнала, обусловленного дефектом, в [21] предложено использовать магнитоноситель, предварительно намагниченный до насыщения. Намагничивание объекта осуществляется противоположно направлению остаточной намагниченности магнитоносителя. При этом запись полей рассеяния дефектов происходит на более крутом участке предельной петли гистерезиса, а не на кривой первоначального намагничивания. Расширение рабочего диапазона магнитной характеристики магнитоносителя объясняется как большей протяженностью ветви предельной петли магнитного гистерезиса, так и отсутствием на ней участка обратимого намагничивания магнитоносителя. При этом приблизительно в 2 раза увеличивается амплитуда сигналов, обусловленных дефектами, и помех. Отношение амплитуд сигнал/шум остается неизменным. Однако если при этом исключить помехи, будет наблюдаться повышение чувствительности метода контроля.

Повысить достоверность контроля сварных соединений многослойных конструкций можно путем учета возможной глубины залегания дефектов, зная, что трещины могут возникать в местах перехода шва через межслойные зазоры соединения, и ориентируясь на расположение этих зон от края шва [22].

Дефекты вида расслоений не обнаруживаются при магнитных методах контроля, т. к. не создают возмущения магнитного потока. Повысить чувствительность контроля пластин на наличие таких дефектов можно, если фиксировать ослабление напряженности поля с наружной стороны пластины из-за наличия расслоений в ней искусственно созданного с обратной стороны пластины локального поля [23].

Если поле дефекта превышает поле выпуклости шва, то сигналограмма будет иметь вид, как и в случае бездефектного шва, но сигналы, обусловленные выпуклостью шва, будут противоположной полярности. Такой дефект обнаруживают по смене полярности сигналов, обусловленных выпуклостью шва, либо наблюдают сигнал, обусловленный дефектом, контролируя объект при режиме, когда сигналы от выпуклости шва не появляются [24].

Тангенциальная составляющая поля дефекта большого раскрытия ($\Delta > 0{,}2$ мм) с ростом напряженности намагничивающего поля увеличивается по линейному закону, а малого ($\Delta < 0{,}02$ мм) – напоминает кривую намагничивания вещества и при $H > 60$ А/см остается постоянной. Повысить точность определения раскрытия поверхностного дефекта можно путем двукратного контроля объекта при двух разных режимах намагничивания выше 60 А/см и сравнения амплитуд сигналов [25].

В [19] предлагается повысить достоверность контроля за счет определения глубины залегания дефекта путем записи магнитного рельефа с обеих сторон стенки намагниченного объекта либо с одной стороны на разном расстоянии от поверхности намагниченного объекта с последующим ее вычислением по формуле.

Чтобы увеличить контраст магнитной записи поля дефекта на ленте, в [26] предлагается произвести предварительный подогрев магнитной ленты, что приведет к увеличению начальной магнитной проницаемости и росту крутизны ее магнитной характеристики.

При записи полей рассеяния дефектов на магнитную ленту, так же как и в магнитной звукозаписи, в [27, 28] предложено использовать подмагничивание магнитоносителя переменным полем. С увеличением его амплитуды контраст записи поля рассеяния дефекта на ленте растет до тех пор, пока вели-

чина подмагничивающего поля не станет больше максимальной коэрцитивной силы ленты, затем наблюдается его уменьшение. В отличие от звукозаписи, намагничивающее поле в данном случае остается постоянным, а переменное подмагничивающее поле убывает от максимального значения до нуля, что является весьма благоприятным для магнитографического контроля, т. к. не накладывает особых условий на выбор частоты подмагничивающего поля.

В [29] предлагают при обнаружении поверхностных и подповерхностных несплошностей в объектах, включая труднодоступные места, намагничивать объект через уложенную на его поверхность магнитную ленту перемещаемым над ней постоянным магнитом, а при считывании записи производить анализ сигналограмм на экране дефектоскопа, фиксируя двуполярные и несколько искаженные однополярные сигналы, что позволит отличить опасные дефекты (трещины, узкие несплавления) от неопасных (углублений от поверхностных неровностей, широких несплавлений). Высокая чувствительность метода контроля при обнаружении поверхностных и подповерхностных дефектов при малой массе намагничивающих устройств (30…50 г) объясняется значительным увеличением напряженности магнитного поля в зоне дефекта при приближении к нему полюса магнита, контролем в приложенном поле, равномерным намагничиванием магнитной ленты.

При контроле на остаточной намагниченности снижается чувствительность метода, т. к. запись части поля дефекта происходит на участке начального (обратимого) намагничивания. То есть дефекты малой величины не обнаруживаются. Если при этом магнитную ленту укладывают на поверхность объекта, доводя ее край до соприкосновения с объектом, а затем поворотом в направлении, перпендикулярном ориентации протяженного дефекта, то не обнаруживаются даже очень крупные дефекты. Это объясняется тем, что при повороте магнитной ленты поле дефекта сильно подмагничивает ее локально, создавая на ней пассивный участок характеристики, поэтому часть поля рассеяния дефекта на ней не записывается. Для повышения чувствительности метода контроля магнитную ленту следует укладывать на объект или сверху вниз, или вдоль направления распространения дефекта [30].

Об отсутствии непровара в корне шва одностороннего стыкового сварного соединения можно судить косвенным путем по наличию на сигналограмме сигналов, обусловленных обратным валиком шва, вследствие резкого изменения сечения соединения у его краев [31]. Их наличие указывает на полное проплавление свариваемых деталей.

В [32] предложено производить запись магнитного рельефа объекта на визуализирующую магнитные поля пленку, фотографировать полученное на пленке изображение цифровой камерой, обрабатывать полученную информацию компьютерными методами, по которой судить о величине дефекта и глубине его залегания в объекте.

Заключение

Анализ литературных источников, включая патенты на изобретения, показал, что повышение достоверности контроля может быть достигнуто:

– за счет создания более широкого магнитного отпечатка на магнитной ленте полем дефекта при обнаружении поверхностных несплошностей микроскопического раскрытия;

– вследствие более точного определения координат расположения дефектов в объекте; последнее достигается перемещением магнитной ленты на

расстояние *l*, а затем на 2*l* в противоположном направлении, а положение проекции дефекта на ленте определяют как среднюю точку полученного магнитного рельефа либо путем записи полей дефектов на две соприкасающиеся магнитные ленты при их одновременном перемещении в противоположных направлениях с последующим считыванием записи одновременно с обеих лент;

– за счет исключения из рассмотрения зон контроля, в которых дефекты обнаруживаются неоднозначно с возможностью занижения величины вследствие делокализации суперпозиции тангенциальных составляющих внешнего поля и поля дефекта на поверхности сварного соединения при увеличении глубины залегания дефекта;

– путем отстройки от помех, вызванных выпуклостью шва, при намагничивании его в поперечном направлении, за счет повторного намагничивания шва импульсным полем соответствующей напряженности противоположного направления;

– за счет отстройки от помех, вызванных поверхностными неровностями, химическими и структурными неоднородностями, путем записи полей-помех на пассивном участке характеристики ленты, созданном предварительно или после записи магнитного рельефа на ленту;

– вследствие реализации принципа раздельного контроля сварных швов, учитывающего как конструктивно-технологические особенности соединения, так и тип и вид дефекта, его ориентацию в объекте;

– путем создания более высокой напряженности поля в шве с помощью концентраторов магнитной индукции или намагничивания объекта по несимметричным петлям гистерезиса до достижения установившегося цикла;

– за счет намагничивания объекта вдоль направления распространения цепочки компактных дефектов с последующим считыванием записи с ленты вдоль направления ее остаточной намагниченности;

– за счет исключения размагничивающего действия выпуклости шва при обнаружении одиночных компактных дефектов;

– путем уменьшения магнитного сопротивления начального и конечного участков шва при обнаружении компактных несплошностей, за счет применения пристыкованных к объекту технологических пластин;

– за счет выбора магнитной ленты такого типа при обнаружении поверхностных дефектов, чтобы рабочая точка ее характеристики при намагничивании объекта с уложенной на его поверхность лентой полем рабочей напряженности была на 20...70 А/см больше ее коэрцитивной силы;

– за счет применения для записи магнитного рельефа объекта поляризованной магнитной ленты и отстройки от помех;

– путем учета возможной глубины залегания дефектов в швах многослойных конструкций, зная, что трещины могут возникать в местах перехода шва через межслойные зазоры соединения, и ориентируясь на расположение этих зон от края шва;

– благодаря фиксации ослабления напряженности поля с наружной стороны пластины искусственно созданного с обратной стороны пластины локального поля из-за наличия расслоений в ней;

– за счет обнаружения крупных протяженных дефектов, создающих поле, превышающее поле выпуклости шва, которые обнаруживают по смене полярности сигналов, обусловленных выпуклостью шва, либо контролируя объект при режиме, когда сигналы от выпуклости шва не появляются;

– за счет определения раскрытия поверхностного дефекта путем двукрат-

ного контроля объекта при двух разных режимах намагничивания выше 60 А/см и сравнения амплитуд сигналов;

– за счет определения глубины залегания дефекта путем записи магнитного рельефа с обеих сторон стенки намагниченного объекта либо с одной стороны на разном расстоянии от поверхности объекта с последующим вычислением глубины залегания дефекта по формуле;

– за счет намагничивания объекта через уложенную на его поверхность ленту перемещаемым над ней постоянным магнитом и фиксации на экране дефектоскопа двуполярных или несколько искаженных однополярных сигналов, чтобы отличить опасные поверхностные дефекты от неопасных в объектах, включая труднодоступные места;

– путем выбора направления укладки магнитной ленты на поверхность объекта при контроле на остаточной намагниченности;

– в результате установления отсутствия непровара в корне шва одностороннего сварного соединения, путем фиксации на сигналограмме сигналов, обусловленных обратной выпуклостью шва при полном проплавлении;

– за счет предварительного подогрева магнитной ленты, что приводит к увеличению начальной магнитной проницаемости и росту крутизны магнитной характеристики ленты, а следовательно, к увеличению контраста магнитной записи полей дефектов на ленте;

– за счет воздействия на магнитную ленту дополнительным переменным полем, убывающим от максимального до нуля;

– за счет записи магнитного рельефа объекта на визуализирующую магнитные поля пленку, фотографирования полученного на пленке изображения цифровой камерой, обработки полученной информации компьютерными методами и использования корреляционных зависимостей, позволяющих определить глубину залегания дефекта и его величину.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ магнитной дефектоскопии: а. с. SU 102537 / Х. С. Маховер, Ю. В. Усенко. – Опубл. 01.01.1956.

2. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. SU 242468 / Ю. Б. Фещенко. – Опубл. 25.04.1969.

3. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. SU 1229671 / А. М. Шарова, В. А. Новиков, М. В. Юдчиц. – Опубл. 07.05.1986.

4. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. SU 1589193 / В. А. Новиков. – Опубл. 30.08.1990.

5. **Новиков, В. А.** Исследование магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений с целью повышения его разрешающей способности: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.11 / В. А. Новиков. – Свердловск, 1985. – 208 л.

6. Способ намагничивания при контроле односторонних сварных соединений: а. с. SU 565245 / А. М. Шарова, В. А. Новиков. – Опубл. 15.07.1977.

7. Способ магнитографического контроля сварных соединений: а. с. SU 1196746 / А. М. Шарова, В. А. Новиков, А. П. Магилинский. – Опубл. 07.12.1985.

8. Способ магнитографического контроля сварных соединений: а. с. SU 1422125 / В. А. Новиков, Л. В. Кублицкая, Т. М. Киселева. – Опубл. 07.09.1988.

9. Способ намагничивания при контроле ферромагнитных изделий: а. с. SU 1546898 / В. А. Новиков. – Опубл. 28.02.1990.

10. Способ магнитографического контроля сварных швов: а. с. SU 1672344 / В. А. Новиков, М. В. Федченко. – Опубл. 23.08.1991.

11. Способ магнитографического контроля сварных швов: а. с. SU 1797033 / В. А. Новиков, В. А. Романов. – Опубл. 23.02.1993.

12. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. SU 1392485 / В. А. Новиков, С. А. Новиков. – Опубл. 18.08.1986.

13. Способ магнитографического контроля сварных соединений: а. с. SU 564583 / А. М. Шарова, В. П. Куликов, В. А. Новиков. – Опубл. 05.07.1977.

14. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. SU 1534380 / В. А. Новиков, Л. В. Кублицкая, Т. М. Киселева. – Опубл. 07.01.1990.

15. Способ магнитографического контроля: а. с. SU 1633349 / В. А. Новиков. – Опубл. 07.03.1991.

16. **Шелихов, Г. С.** Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г. С. Шелихов. – Москва: Эксперт, 1995. – 219 с.: ил.

17. Способ магнитографического контроля: а. с. SU 1677601 / В. А. Новиков. – Опубл. 15.09.1991.

18. Способ магнитографического контроля стыковых сварных соединений: а. с. SU 1786417 / В. А. Новиков, В. А. Романов. – Опубл. 07.01.1993.

19. **Козлов, В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 280 с.: ил.

20. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. SU 2052802 / В. А. Новиков. – Опубл. 20.01.1996.

21. Способ магнитографической дефектоскопии: а. с. SU 174415 / Н. С. Акулов, В. С. Козлов. – Опубл. 27.08.1956.

22. Способ магнитографического контроля многослойных сварных соединений: а. с. SU 2029297 / В. А. Новиков, В. А. Романов, А. В. Волченков. – Опубл. 20.02.1995.

23. Способ магнитографического контроля ферромагнитных материалов: а. с. SU 877417 / А. М. Шарова, В. А. Новиков, В. П. Куликов. – Опубл. 30.10.1981.

24. Способ магнитографического контроля стыковых сварных соединений: а. с. SU 1506346 / В. А. Новиков. – Опубл. 07.09.1989.

25. Способ магнитного контроля изделий: а. с. SU 1567964 / В. А. Новиков. – Опубл. 30.05.1990.

26. Регистратор магнитных полей для магнитографии: а. с. SU 371499 / В. С. Козлов, А. М. Гордон, О. А. Жолнерович. – Опубл. 22.02.1973.

27. **Жолнерович, О. А.** О выборе магнитных лент для магнитографической дефектоскопии / О. А. Жолнерович, А. Д. Хаит // Дефектоскопия. – 1980. – № 1. – С. 104–106.

28. Физические основы магнитной звукозаписи / А. А. Вроблевский [и др.]. – Москва: Энергия, 1970. – 368 с.

29. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий: пат. SU 2154818 / В. А. Новиков. – Опубл. 20.08.2000.

30. **Новиков, В. А.** Некоторые особенности магнитографического контроля ферромагнитных объектов на остаточной намагниченности / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 сент. 2017 г. – Могилев, 2017. – С. 138–143.

31. **Кушнер, А. В.** Обнаружение дефектов в стыковых сварных соединениях косвенным методом / А. В. Кушнер, А. В. Шилов, В. А. Новиков // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 29–30 сент. 2022 г. – Могилев, 2022. – С. 129–133.

32. Способ магнитографической дефектоскопии объекта и устройство для его осуществления: пат. BY 21905 / В. А. Новиков, А. В. Шилов. – Опубл. 28.02.2018.

Статья сдана в редакцию 8 января 2024 года

Контакты:
valeria.pantyushina@mail.ru (Пантюшина Валерия Геннадьевна);
novikovva@tut.by (Новиков Владимир Алексеевич).

V. G. PANTYUSHINA*, *V. A. NOVIKOV

ANALYSIS OF METHODS FOR MAGNETOGRAPHIC INSPECTION OF FERROMAGNETIC OBJECTS

Abstract

Methods for magnetographic inspection of ferromagnetic objects have been analyzed. It has been established that an increase in the reliability of testing can be achieved by excluding from consideration the areas of connection, in which a defect is detected ambiguously with the possibility of underestimating the value; by implementing the principle of separate inspection of seams for the presence of defects of different types; by tuning out interference; as well as by excluding the demagnetizing effect of seam convexity and increasing the accuracy of determining the coordinates of the location and size of defects, etc. The technical solutions have been generalized and systematized, which will make it possible to develop a universal technique for magnetographic testing of ferromagnetic objects.

Keywords:

magnetographic method, inspection methods, reliability, ferromagnetic objects, flaw detection, analysis.

For citation:

Pantyushina, V. G. Analysis of methods for magnetographic inspection of ferromagnetic objects / V. G. Pantyushina, V. A. Novikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 87–98.

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-99-107

УДК 697.93

А. С. ГАЛЮЖИН, *канд. техн. наук*, *доц.*
О. М. ЛОБИКОВА
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДЫ В ГРАВИТАЦИОННО-МАГНИТНОМ ПОЛЕ КАПЛЕУЛОВИТЕЛЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация

Разработана математическая модель движения частицы воды в криволинейном канале каплеуловителя системы вентиляционной установки под воздействием силы тяжести, центробежной силы, силы Лоренца и силы Кориолиса. Показано, что эффективность использования магнитного поля для улавливания микрочастиц воды достаточно высокая, поскольку превышает центробежную силу примерно на два порядка. Данная модель может быть рекомендована к использованию при создании каплеуловителя вентиляционной установки.

Ключевые слова:

воздуховод, каплеуловитель, магнитное поле, частица воды.

Для цитирования:

Галюжин, А. С. Математическая модель движения частицы воды в гравитационно-магнитном поле каплеуловителя вентиляционной установки / А. С. Галюжин, О. М. Лобикова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 99–107.

Введение

В современных вентиляционных установках широко применяются утилизаторы тепла (рекуператоры). При этом на выходе рекуператора понижается температура удаляемого воздуха и зачастую наступает состояние насыщения. В этом случае в удаляемом воздухе образуются частицы воды (конденсат), которые при отрицательных температурах замерзают в вытяжном воздуховоде. Процесс замерзания в основном происходит на стенках вытяжного воздуховода, поскольку температура стенки воздуховода будет отрицательной [1, 2]. В результате происходит уменьшение проходного сечения данного воздуховода и, соответственно, увеличивается газодинамическое сопротивление вытяжного воздуховода, воздухообмен уменьшается, а затраты электроэнергии на привод вытяжного вентилятора возрастают [3]. В конечном итоге вентиляционная установка прекращает фактически выполнять свои функции, вплоть до полного отказа работы оборудования. Поскольку количество календарных дней с отрицательными температурами наружного воздуха на территории Беларуси в разные годы составляет 85…110 дней, игнорировать данную проблему недопустимо.

Поэтому вентиляционные установки снабжаются каплеуловителями, зачастую наиболее простыми по конструкции – пластинчатыми [4].

Используемые пластинчатые кап-

© Галюжин А. С., Лобикова О. М., 2024

леуловители различаются по форме профиля пластин и наличию на них дополнительных элементов, увеличивающих, по мнению производителей, процесс улавливания капель воды из удаляемого воздуха [5]. На практике данные усложнения конструкции приводят зачастую к обратному эффекту, а именно к возникновению вихревых зон между пластиной каплеуловителя и данными дополнительными элементами, попадая в которые частицы воды выносятся из каплеуловителя и выпадают конденсатом на стенках вытяжного воздуховода [5]. Наиболее простой и в то же время эффективной является конструктивная схема каплеуловителя, представленная на рис. 1.

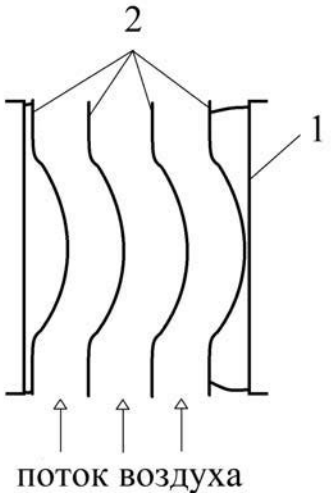


Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема пластинчатого каплеуловителя вентиляционной установки: 1 – корпус; 2 – пластины каплеуловителя

Такой каплеуловитель вентиляционной установки содержит вертикально установленные изогнутые пластины 2, установленные в прямоугольном корпусе 1 [4]. Изогнутые пластины обеспечивают движение частиц воды вместе с потоком воздуха по криволинейной траектории (см. рис. 1). При этом возникает центробежная сила инерции, отбрасывающая частицы воды к вогнутой поверхности пластин, которые стекают вниз в дренаж.

Основная часть

При проектировании пластинчатых каплеуловителей вентиляционных установок зачастую используется эмпирический метод, чем обусловлена низкая эффективность данных каплеуловителей [5, 6]. Для решения данной задачи в [7] предложена математическая модель движения частицы воды в пластинчатом каплеуловителе и получены соответствующие дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} m_{\text{ЧВ}}\ddot{x} = m_{\text{ЧВ}}\omega_e^2 x - 0,5k_{\text{СП}}S_{\text{СП}}\rho_{\text{ВЗ}}\dot{x}^2; \\ m_{\text{ЧВ}}\ddot{y} = -2m_{\text{ЧВ}}\omega_e\dot{x} - 0,5k_{\text{СП}}S_{\text{СП}}\rho_{\text{ВЗ}}\dot{y}^2; \\ m_{\text{ЧВ}}\ddot{z} = m_{\text{ЧВ}}g - 0,5k_{\text{СП}}S_{\text{СП}}\rho_{\text{ВЗ}}\dot{z}^2, \end{cases} \quad (1)$$

где $m_{\text{ЧВ}}$ – масса частицы воды 4, движущейся в канале между пластинами 1 и 2 каплеуловителя вентиляционной установки (рис. 2), кг; x, y, z – координаты частицы воды 4 в системе координат, совершающей криволинейное движение вместе с потоком воздуха; ω_e – угловая скорость частицы воды в канале, $с^{-1}$; $k_{\text{СП}}$ – коэффициент лобового сопротивления частицы воды 4 (см. рис. 2);

$S_{СП}$ – площадь проекции частицы воды на плоскость, перпендикулярную оси y, м^2; $\rho_{ВЗ}$ – плотность потока воздуха, находящегося в канале между пластинами 1 и 2 пластинчатого каплеуловителя (см. рис. 2), кг/м^3.

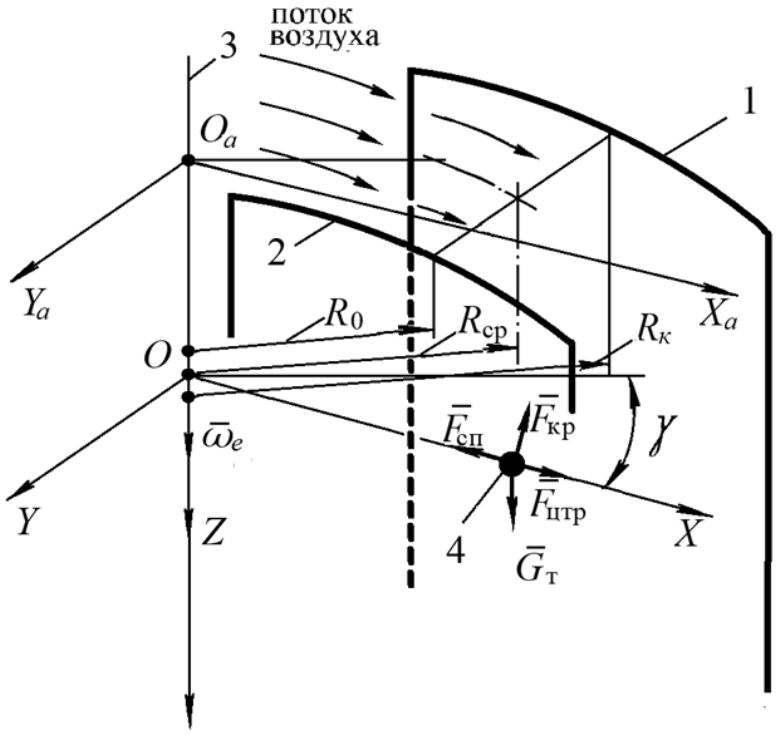


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу воды 4, которая движется в канале между изогнутыми пластинами 1 и 2; 3 – вертикальная ось, проходящая через центр кривизны условной криволинейной поверхности, образованной в центре канала

Для расчета длины изогнутых пластин каплеуловителя необходимо определить зависимость $t = f(x)$, т. к. зная время t движения частицы воды от одной пластины к другой и среднюю скорость движения потока воздуха в канале $V_{ср}$, можно определить длину пути l движения воздуха в канале, при котором частицы воды, находящиеся возле выпуклой поверхности пластины 2 (см. рис. 2), достигают внутренней поверхности пластины 1. Очевидно, что эта длина пути будет равна длине изогнутых пластин.

$$l = V_{ср} \cdot t. \qquad (2)$$

Для расчета l вначале определим массу и площадь лобового сопротивления частиц воды различного диаметра с помощью известных формул, приняв при этом плотность воды $\rho_в = 10^3$ кг/м^3, и сведем эти данные в табл. 1.

Коэффициент лобового сопротивления $k_{СП}$ для капли воды принят в соответствии с [8, с. 257–260]: $k_{СП} = 0{,}62$. Расчеты проведены в программном пакете *Mathcad* при $\omega_e = 50$ с$^{-1}$, $R_0 = x_0 = 0{,}05$ м, $R_{ср} = 0{,}1$ м, $R_к = 0{,}15$ м, $\dot{x}_0 = 0$, $t_0 = 0$ и абсолютном давлении воздуха $p_{сж} = 0{,}1$ МПа. Решение дифференциальных уравнений (1) позволило построить соответствующие графики зависимости $x = f(t)$ (рис. 3).

Табл. 1. Площадь лобового сопротивления и масса частиц воды различного диаметра

Диаметр частицы воды $d_ч$, мкм	Площадь лобового сопротивления $S_{СП}$, м^2 ($S_{СП} = \pi d_ч^2/4$)	Масса частицы воды $m_{ЧВ}$, кг ($m_{ЧВ} = \rho_в \pi d_ч^2/4$)
1	$0{,}785 \cdot 10^{-12}$	$0{,}523 \cdot 10^{-15}$
5	$0{,}196 \cdot 10^{-10}$	$0{,}654 \cdot 10^{-13}$
10	$0{,}785 \cdot 10^{-10}$	$0{,}523 \cdot 10^{-12}$
50	$0{,}196 \cdot 10^{-8}$	$0{,}654 \cdot 10^{-10}$
100	$0{,}785 \cdot 10^{-8}$	$0{,}523 \cdot 10^{-9}$
500	$0{,}196 \cdot 10^{-6}$	$0{,}654 \cdot 10^{-7}$

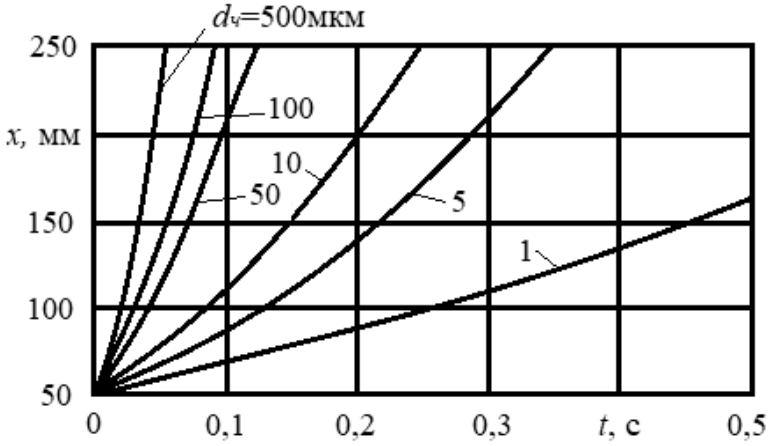


Рис. 3. Зависимость линейной величины перемещения частиц воды различного диаметра $d_ч$ по оси X в канале каплеуловителя вентиляционной установки от времени движения t при угловой скорости $\omega_e = 50$ с$^{-1}$, $R_0 = 0{,}05$ м, $R_{ср} = 0{,}1$ м и $R_к = 0{,}15$ м

Проанализируем эти графики. Время движения частицы воды от пластины 2 до пластины 1 (см. рис. 2) диаметром $d_ч = 1$ мкм при упомянутых выше исходных данных будет равно примерно $t = 0{,}47$ с. При $\omega_e = 50$ с$^{-1}$ и $R_{ср} = 0{,}1$ м средняя скорость движения $V_{ср} = 5$ м/с, что соответствует требованиям при проектировании вентиляционных систем [5, 6]. Используя зависимость (2), определим длину пути l движения воздуха в канале (длину изогнутых пластин): $l = 2{,}35$ м. Для частиц с диаметром $d_ч = 50$ мкм $l = 0{,}4$ м. Результаты дальнейших расчетов для последующего анализа сведем в табл. 2.

Анализ табл. 2 и рис. 3 показывает, что для улавливания частиц воды диаметром $d_ч = 50$ мкм $= 0{,}05$ мм длина пластин $l = 0{,}435$ м $= 435$ мм, т. е. конструкция каплеуловителя будет достаточно громоздкой. В рассмотренном случае при создании достаточно компактной конструкции с длиной пластин $l = 0{,}1$ м можно обеспечить улавливание частиц воды до $d_ч = 74$ мкм. Следует отметить, что при увеличении длины пластин растут линейные газодинамические потери давления и, соответственно, потери энергии на привод вытяжного вентилятора. Для уменьшения длины пластин l можно уменьшить расстояние между пластинами $R_к - R_0$. При этом практически пропорционально умень-

шится длина пластин l, но существенно увеличатся потери давления в местных сопротивлениях каплеуловителя.

Проанализируем систему уравнений (1). Очевидно, что для увеличения эффективности работы каплеуловителя без изменения длины пластин и расстояния между ними необходимо дополнить центробежную силу $F_{цтр}$ (см. рис. 2) другой силой, совпадающей по направлению с $F_{цтр}$. На основе теории магнитного поля [9, с. 141–156] известно, что на заряженные частицы q, которые движутся в магнитном поле, воздействует сила Лоренца $F_{лр}$. При этом направление действия $F_{лр}$ обусловливается с помощью правила левой руки, а модуль $F_{лр}$ – на основе зависимости

$$F_{лр} = q\,V_{ср}\,B\sin\alpha, \qquad (3)$$

где α – угол между векторами средней скорости потока воздуха в канале каплеуловителя вентиляционной установки $V_{ср}$ и магнитной индукции B, град (рис. 4).

Табл. 2. Минимальная длина изогнутых пластин каплеуловителя при $V_{ср.к}$ = 5 м/с, R_0 = 0,05 м, $R_{ср}$ = 0,1 м и $R_к$ = 0,15 м

Диаметр частицы воды $d_ч$, мкм	Время движения частицы воды от пластины 2 до пластины 1 t, c	Длина изогнутой пластины l, м
1	0,542	2,71
5	0,247	1,23
10	0,174	0,87
50	0,087	0,435
100	0,0066	0,033
500	0,0046	0,023

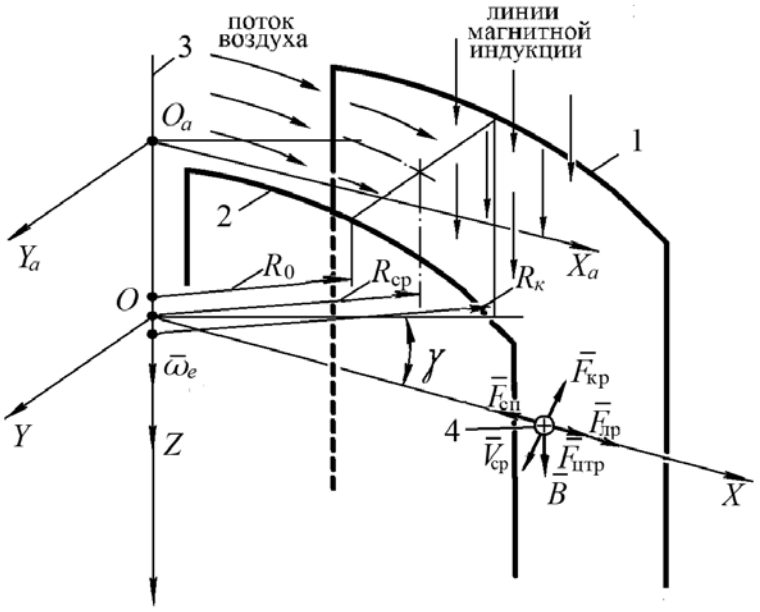


Рис. 4. Схема сил, действующих на частицу воды 4, которая движется в магнитном поле канала каплеуловителя вентиляционной установки между изогнутыми пластинами 1 и 2; 3 – вертикальная ось, проходящая через центр кривизны условной криволинейной поверхности, образованной в центре канала

Следовательно, при данной схеме движения воздуха и, соответственно, частиц воды 4 в канале каплеуловителя (см. рис. 4) и обеспечении направления вектора магнитной индукции B вертикально вниз, сила Лоренца $F_{лр}$, в случае придания частице воды 4 положительного заряда, будет направлена так же, как и центробежная сила $F_{цтр}$. Это означает, что для увеличения эффективности работы каплеуловителя необходимо придать частице воды электрический заряд и внутри каналов каплеуловителя вентиляционной установки создать магитное поле.

При этом система дифференциальных уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} m_{чВ}\ddot{x} = m_{чВ}\omega_e^2 x + q\ \ \omega_e\ B\ x - 0,5k_{СП}S_{СП}\rho_{ВЗ}\dot{x}^2; \\ m_{чВ}\ddot{y} = -2m_{чВ}\omega_e\dot{x} - 0,5k_{СП}S_{СП}\rho_{ВЗ}\dot{y}^2; \\ m_{чВ}\ddot{z} = m_{чВ}g - 0,5k_{СП}S_{СП}\rho_{ВЗ}\dot{z}^2. \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим возможности реализации данного способа. Как отмечалось выше, одним из условий возникновения силы Лоренца является придание частице воды электрического заряда, т. е. данную частицу необходимо ионизировать. Одним из способов ионизации частиц воды является воздействие на них электромагнитного поля. Энергия ионизации молекул воды $E_в$ известна и равна $E_в$ = 12,58...12,621 эВ ≈ $2\cdot10^{-18}$ Дж [10, с. 68; 11; 12]. Длина волны λ определяется по известной зависимости

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_в}, \quad (5)$$

где h – значение постоянной Планка, h = 6,626 070 · 10^{-34} Дж·с [13, с. 10]; c – абсолютная величина скорости света в вакууме, c = 299 792 458 м/с [11, с. 10].

Подставим приведенные выше значения h и c в (5) и в результате получим $\lambda = 9,94 \cdot 10^{-8}$ м. Такая длина волны соответствует УФ-излучению [14, с. 236]. Таким образом, облучение потока удаляемого из помещения воздуха УФ-излучением с длиной волны примерно 1000 нм дает возможность убрать с внешней орбитали молекулы воды хотя бы один электрон.

При этом известно, что во влажном воздухе главными компонентами являются молекулы азота N_2 и кислорода O_2. Для ионизации этих молекул необходима следующая энергия: O_2 – 12,0697 эВ и N_2 – 15,5810 эВ [10], т. е. энергии ионизации молекулы O_2 близки к энергии ионизации молекулы воды. Таким образом, получили, что энергии ионизации молекулы O_2 меньше энергии ионизации молекул воды всего лишь в 1,22 раза. Это означает, что для исключения ионизации молекул O_2 источник УФ-излучения должен быть узкополосным с длиной волны $\lambda \approx 1 \cdot 10^{-7}$ м.

Кроме того, следует учитывать, что массы молекул H_2O, O_2 и N_2 отличаются и равны согласно [10, с. 10]: H_2O – $2,993 \cdot 10^{-26}$ кг; O_2 – $5,315 \cdot 10^{-26}$ кг; N_2 – $4,651 \cdot 10^{-26}$ кг. Вследствие этого при продвижении этих молекул по криволинейной траектории максимальная величина $F_{цтр}$ будет воздействовать на молекулу кислорода O_2. При этом молекулы H_2O из-за своей дипольности в воздухе формируют димеры, тримеры и полимеры воды, т. е. $(H_2O)_2$, $(H_2O)_3$ и $(H_2O)_n$ [15, с. 149], а молекулы O_2 и N_2 таких образований не создают. Тогда $F_{цтр}$ будет прямопропорциональна количеству молекул в частице воды. При этом $F_{цтр}$, действующая на димер воды, будет более, чем на молекулы O_2 и N_2. Поэтому при движении удаляемого воз-

духа по криволинейной траектории к пластине 1 (см. рис. 4) ионизированные димеры воды будут приближаться быстрее.

Проведенный анализ показывает, что в каплеуловитель вентиляционной установки должен попадать поток воздуха с ионизированными молекулами воды, поэтому УФ-облучатели необходимо устанавливать перед входом воздуха в каплеуловитель.

При упомянутом выше облучении потока воздуха в канале будут образовываться положительные ионы воды и электроны. При попадании в магнитное поле они будут двигаться относительно потока воздуха в противоположных направлениях. Рассмотрим дальнейшие процессы взаимодействия электронов с молекулами O_2 и N_2. Известно, что максимальным подобием к электрону характеризуется кислород (1,47 эВ), для азота соответствующее значение отрицательно и составляет − 0,21 эВ [16]. Таким образом, электроны при движении по направлению к выпуклой части пластин каплеуловителя вентиляционной установки преимущественно будут связываться с молекулами O_2. Данное явление известно и используется в конструкции ионизаторов воздуха [17]. Известно, что время существования отрицательных ионов кислорода составляет несколько десятков секунд [15]. Число молекул кислорода в потоке воздуха почти на два порядка больше, чем число частиц воды, поэтому можно утверждать, что из-за незначительного времени прохождения потока воздуха в канале каплеуловителя (см. рис. 3) отрицательные ионы кислорода будут покидать магнитное поле до потери захваченного электрона, выбитого из молекулы воды.

Проанализируем эффективность данного способа. Предположим, что димер воды массой $m_{\text{ЧВ}} = 5{,}986 \cdot 10^{-26}$ кг [10] потерял один электрон. В соответствии с этим он приобретет положительный заряд $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл [10]. Для упомянутого выше канала каплеуловителя с $R_0 = 0{,}05$ м, $R_{\text{ср}} = 0{,}1$ м и $R_{\text{к}} = 0{,}15$ м определим силы $F_{\text{цтр}}$ и $F_{\text{лр}}$. Примем, что в канале каплеуловителя вентиляционной установки создано магнитное поле с небольшой индукцией $B = 0{,}02$ Тл. Рассмотрим соотношение силы Лоренца и центробежной силы, которые будут действовать на ионизированную молекулу воды при выбитом одном электроне. Центробежную силу $F_{\text{цтр}}$ определим с помощью известной зависимости

$$F_{\text{цтр}} = m_{\text{ЧВ}} V_{\text{ср}}^2 / R_{\text{ср}}. \qquad (6)$$

Расчеты проведем с помощью зависимостей (3) и (6). В результате получим, что отношение $F_{\text{лр}} / F_{\text{цтр}} = 600$, а для тримера воды такое отношение будет равно 394.

Заключение

Разработана математическая модель движения частицы воды в криволинейном канале каплеуловителя вентиляционной установки под воздействием силы тяжести, центробежной силы, силы Лоренца и силы Кориолиса. Эффективность использования магнитного поля для улавливания микрочастиц воды в пластинчатом каплеуловителе вентиляционной установки достаточно высокая, поскольку превышает центробежную силу примерно на два порядка. Таким образом, для ликвидации микрочастиц воды из удаляемого из помещения воздуха метод использования магнитного поля является достаточно эффективным, поскольку позволяет существенно повысить суммарную силу, отбрасывающую микрочастицы воды к

вогнутой поверхности пластин каплеуловителя вентиляционной установки.

Данная модель может быть рекомендована к использованию при создании каплеуловителя вентиляционной установки.

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.

2. **Галюжин, С. Д.** Определение исходных данных для проектирования устройства удаления конденсата из рекуператора вентиляционной установки / С. Д. Галюжин, Н. В. Лобикова, О. М. Лобикова // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 7. – С. 63–71.

3. **Галюжин, С. Д.** Экономическая выгода мероприятий повышения энергетической эффективности систем вентиляции / С. Д. Галюжин, Н. В. Лобикова, О. М. Лобикова // Казахстан-Холод 2019: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Алматы, 20–21 февр. 2019 г. – Алматы: АТУ, 2019. – С. 104–110.

4. Каплеуловитель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/. – Дата доступа: 07.01.2023.

5. **Галюжин, С. Д.** Анализ пластинчатых каплеуловителей вентиляционных установок / С. Д. Галюжин, О. М. Лобикова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 256–257.

6. **Фомин, А. Н.** Проблемы, возникающие при образовании капельной жидкости в вертикальных вентиляционных трубопроводах, расположенных в стволах глубоких шахт, и способ их решения / А. Н. Фомин, А. С. Выскребенец, Г. И. Свердлик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S30. – С. 19–26.

7. **Галюжин, С. Д.** Математическая модель движения частицы воды в каплеуловителе вентиляционной установки / С. Д. Галюжин, О. М. Лобикова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 1. – С. 63–70.

8. **Альтшуль, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика: учебник / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – Москва: Стройиздат, 1987. – 414 с.

9. **Говорков, В. А.** Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1968. – 488 с.

10. **Радциг, А. А.** Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – Москва: Атомиздат, 1980. – 240 с.

11. **Mallard, W. G.** NIST Chemistry Webbook. NIST Standard Reference Database / W. G. Mallard, P. Linstrom // Gaithersburg: Nat. Standards and Technol. – 2000. – № 69.

12. **Завилопуло, А. Н.** Ионизация молекул азота, кислорода, воды и двуокиси углерода электронным ударом вблизи порога / А. Г. Завилопуло, Ф. Ф. Чипев, О. Б. Шпеник // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, вып. 4. – С. 19–24.

13. **Радциг, А. А.** Параметры атомов и атомных ионов: справочник / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.

14. **Трофимова, Т. Н.** Курс физики: учебник / Т. Н. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 1985. – 432 с.

15. **Глинка, Н. Л.** Общая химия: учебное пособие / Н. Л. Глинка; под ред. В. А. Рабиновича. – Ленинград: Химия, 1983. – 704 с.

16. **Гороновский, И. Т.** Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаченко, Е. Ф. Некряч. – Киев: Наукова думка, 1987. – 829 с.

17. **Чижевский, А. Л.** Аэроионификация в народном хозяйстве / А. Л. Чижевский. – Москва: Стройиздат, 1989. – 487 с.

Статья сдана в редакцию 1 февраля 2024 г.

Контакты:
sasa-gas@mail.ru (Галюжин Александр Сергеевич);
olg.lobikova@yandex.by (Лобикова Ольга Михайловна).

A. S. GALYZHIN*, *O. M. LOBIKOVA

MATHEMATICAL MODEL OF A WATER PARTICLE MOVING IN THE GRAVITATIONAL MAGNETIC FIELD OF A DRIFT ELIMINATOR OF A VENTILATION UNIT

Abstract

A mathematical model has been developed for a water particle moving in a curvilinear channel of a drift eliminator of the ventilation unit system under the influence of gravity, centrifugal force, Lorentz force and Coriolis force. It is shown that the efficiency of using the magnetic field to capture water microparticles is quite high, since it exceeds the centrifugal force by approximately two orders of magnitude. This model can be recommended for use when developing a drift eliminator for ventilation units.

Keywords:

air duct, drift eliminator, magnetic field, water particle.

For citation:

Galyzhin, A. S. Mathematical model of a water particle moving in the gravitational magnetic field of a drift eliminator of a ventilation unit / A. S. Galyzhin, O. M. Lobikova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 99–107.

ФИЗИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-108-117

УДК 537.523.5:621.791.75

А. И. ЛЯПИН, *канд. физ.-мат. наук*, *доц.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ «ХОЛОДНОГО» КАТОДА СВАРОЧНОЙ ДУГИ В ПАРАХ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Аннотация

Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги основана на известных экспериментальных данных, которые получены при исследовании перехода от тлеющего разряда к дуговому разряду. Указанная модель базируется на следующих представлениях: источником свободных электронов является металлический катод сварочной дуги; электроны покидают «холодный» катод в результате действия электрического поля пространственных зарядов и нагрева; генерация свободных носителей заряда в газе происходит в результате ионизации за счет энергии электрического поля. Показано, что обобщенная модель может объяснить большие значения разрядного тока в случае «холодных» катодов. Результаты оценочных расчетов тока дуги со стальным катодом при температуре, равной $T = 2500$ К, близки к известным опытным данным.

Ключевые слова:

электросварочная дуга, «холодный» катод, катодная область, элементарные процессы, обобщенная модель процессов.

Для цитирования:

Ляпин, А. И. Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении / А. И. Ляпин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 108–117.

Введение

Известно, что процессы, необходимые для зажигания и стационарного горения сварочной дуги протекают в ее катодной области. По нашим данным в настоящее время отсутствует общепризнанная модель процессов и механизмов генерации свободных носителей заряда в области «холодного» катода сварочной дуги. Поэтому в работе рассматривается катодная область дуги.

Рассмотрим значение некоторых терминов, встречающихся в литературе.

«Дуга в газе» означает, что электрический разряд горит между неплавящимися электродами в атмосфере какого-либо газа. При плавлении и испарении электродов дуга горит в их парах и называется «дуга в парах». Дуга может гореть в парах как легкоплавких, так и тугоплавких электродов, если они нагреты до температуры плавления. При электродуговой сварке используются «дуга в газе», «дуга в парах» и их комбинация.

Если термоэлектронная эмиссия из катода, нагретого до температуры плавления, обеспечивает разрядный ток до нескольких тысяч ампер, то в этом случае катод называется «горячим» (например, W, C). Если же при нагревании катода вплоть до температуры плавления термоэлектронная эмиссия

© Ляпин А. И., 2024

не обеспечивает указанного тока, то такой катод называется «холодным». Например, при температуре плавления «холодного» стального катода плотность тока термоэлектронной эмиссии составляет лишь 5 %...10 % от тока сварочного режима.

Таким образом, в случае сварочной дуги термины «холодный» и «горячий» в первую очередь характеризуют максимальный ток термоэлектронной эмиссии из рассматриваемого катода.

Характерной особенностью сварочной дуги являются очень большие токи (~10^3 А/см^2) и относительно небольшие напряжения (от 8 до 25 В). Согласно современным представлениям в катодной области разрядный ток имеет электронную и ионную составляющие, при этом свободные ионы возникают в основном при ионизации молекул газа.

В связи с этим возникает вопрос: что является источником электронов, газ или катод, и каковы механизмы генерации свободных электронов и ионизации молекул газа в катодной области?

В случае «горячих» катодов ответ известен: катод является источником первичных электронов, которые возникают вследствие термоэлектронной эмиссии и, ускоряясь в поле катодного падения потенциала, ионизируют молекулы газа.

Основное затруднение теории сварочной дуги связано с объяснением большого электронного тока порядка 10^3 А/см^2 в случае «холодных» катодов. Как было отмечено выше, плотность тока термоэлектронной эмиссии из стального катода на порядок меньше наблюдаемого на практике сварочного тока. Мнения исследователей расходятся при выборе источника свободных электронов и механизма ионизации газа. Начиная с 20-х гг. прошлого века, при разработке теории сварочной дуги возникли два направления. В одних теориях в качестве источника свободных заряженных частиц выбран газ, и его ионизация происходит за счет тепловой энергии частиц (термическая ионизация). В других теориях источником свободных электронов является металл (катод) и ионизация газа происходит за счет энергии электрического поля (ударная ионизация). Следует отметить неудачность термина «ударная», т. к. в обоих рассмотренных случаях ионизация происходит в результате столкновения частиц с достаточно высокими энергиями. Отличие между двумя механизмами ионизации заключается в природе энергии, за счет которой частицы ускоряются. Здесь возникает вопрос об отождествлении энергии теплового движения с энергией, приобретенной в электрическом поле.

В 1926 г. автором [1] в основу созданной им теории был положен механизм генерации свободных электронов и ионов, основанный на термической ионизации. В этом случае источником свободных электронов выбран газ. Автор предполагал существование, на расстоянии 1–10 свободных пробегов от катода, некоторой ионизационной области с высокой температурой, достаточной для термической ионизации молекул газа (пара). В предлагаемой модели ионы из ионизационной области двигаются к катоду и бомбардируют его, а электроны – к аноду, ионизируя газ в анодном столбе.

Кажущаяся простота подхода заключается в одновременном возникновении свободных иона и электрона в объеме газа вне зависимости от наличия катода. Плотность разрядного тока определяется степенью ионизации газа, которая вычисляется известной формулой Сага [1]. В этом случае разрядный ток в катодной области обусловлен только ионной компонентой. По мнению некоторых авторов [2] предложенная модель и созданная на ее основе теория объясняет большинство наблюдаемых свойств сварочной дуги.

Вместе с тем приведенная теория вызвала обоснованные возражения некоторых авторов [3–7]. Одним из недостат-

ков этой теории считается то, что в ней исключается роль катода в генерации свободных зарядов. В то же время и сегодня можно встретить работы сторонников теории термической ионизации.

Целью работы является попытка получить обобщенную модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении.

Для достижения этой цели необходимо выбрать источник свободных электронов (газ или катод) и обобщить экспериментально подтвержденные представления о механизмах генерации свободных носителей заряда в катодной области.

Эмиссия электронов из холодного катода

Для объяснения электронной эмиссии из «холодных» катодов был привлечен эффект Шотки, который заключается в снижении работы выхода электрона из катода при наличии у его поверхности внешнего электрического поля. Расчеты Шотки в рамках классических представлений показали, что при наличии у катода внешнего электрического поля с напряженностью E, В/см, работа выхода должна уменьшаться на величину $\Delta A = e^{3/2} \cdot E^{1/2}$, где e – заряд электрона. В этом случае плотность тока насыщения определяется следующим выражением [3]:

$$j = 120,4 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot \varphi_{вых} - e^{3/2} \cdot E^{1/2}}{k \cdot T} \right). \quad (1)$$

После подстановки постоянных значений формула (1) в системе СИ принимает следующий вид:

$$j = 120,4 \cdot T^2 \cdot \exp\left[-1,16 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\varphi_{вых} - 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot (E)^{1/2}}{T} \right) \right], \quad (2)$$

где T – абсолютная температура; $\varphi_{вых}$ – работа выхода электрона из катода, эВ; E – напряженность электрического поля у катода, В/см.

На рис. 1 приведены графики зависимости плотности тока от напряженности электрического поля у стального катода при температурах $T1$ = 2000 К и $T2$ = 3000 К. Этот интервал температур охватывает температуры плавления большинства материалов, применяемых при дуговой сварке плавлением.

Из рис. 1 видно, что при максимальных значениях температуры $T = 3000$ К и напряженности $E = 2 \cdot 10^5$ В/см плотность тока может достигать значения 130 А/см^2. Это примерно в 20 раз меньше требуемого сварочного тока. Следует отметить, что теория эффекта Шотки применима при напряженностях поля меньше 10^6 В/см. При более высоких напряженностях поля значительную роль начинает играть автоэлектронная эмиссия, связанная с туннельным эффектом. Плотность тока автоэлектронной эмиссии описывается формулой Фаулера – Нордгейма [8], полученной в 1928 г. на основе квантовой статистики Ферми – Дирака. По указанной формуле реально заметные токи можно получить при напряженностях поля у катода порядка 10^6 В/см и выше.

Результаты расчетов показали, что с учетом эффекта Шотки и автоэлектронной эмиссии приемлемых значений плотности дугового тока можно достичь при неоправданно больших напряженностях электрического поля. Кроме того, в формулу Фаулера – Нордгейма температура не входит. Точнее формула

записана для T = 0 К. То есть рассматриваемая формула не отражает динамику температурно-зависимых процессов.

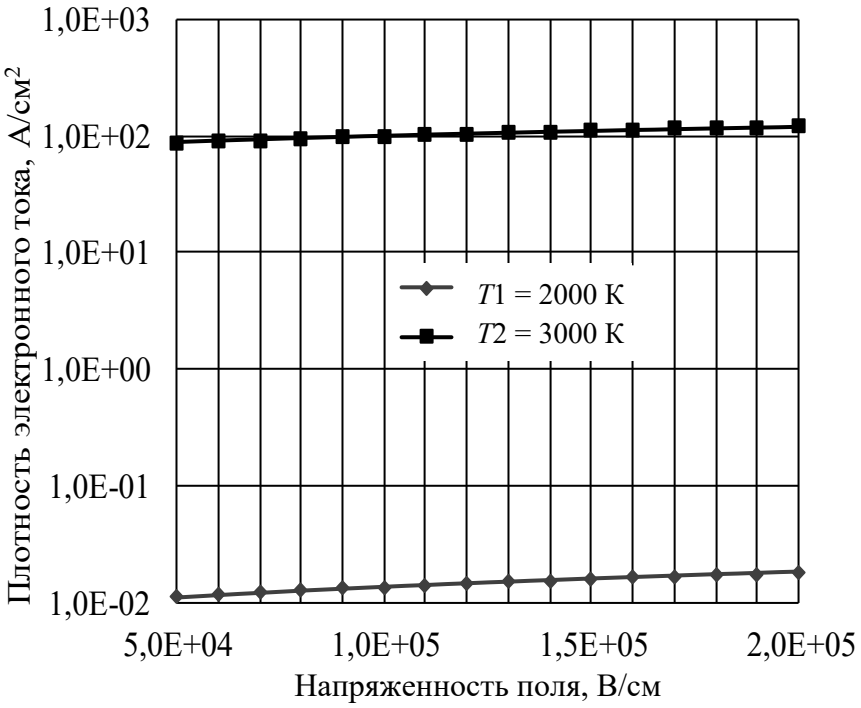


Рис. 1. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля у стального катода при температурах $T1$ = 2000 К и $T2$ = 3000 К

Заслуживает внимание выражение для плотности электронного тока термоавтоэлектронной эмиссии, приведенное в [3] и полученное в предположении, что при температурах выше 1000 К «нагревание катода равносильно увеличению напряженности электрического поля»:

$$j = A \cdot \left(T + c \cdot E\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot \varphi_{вых}}{k \cdot \left(T + c \cdot E\right)}\right), \quad (3)$$

где j – плотность тока, А/см^2; A – постоянная, A = 60,2 А/см^2; T – абсолютная температура, К; c – постоянная, для железа $c = 10^{-2}$; E – напряженность электрического поля, В/см; e – заряд электрона; $\varphi_{вых}$ – работа выхода электрона, эВ; k – постоянная Больцмана.

Выражение (3) хорошо согласуется с экспериментально установленным фактом увеличения плотности тока с ростом плотности газа или пара у поверхности катода. С учетом значений постоянных величин формула (3) принимает следующий вид:

$$j = 60,2 \cdot \left(T + 10^{-2} \cdot E\right)^2 \cdot \exp\left(-1,16 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varphi_{вых}}{\left(T + 10^{-2} \cdot E\right)}\right). \quad (4)$$

Согласно [3], выражение (3) может быть получено на основе квантово-механических представлений. По сравнению с формулой Фаулера – Нордгей-

ма выражение (3) в явном виде содержит температуру катода.

Для расчетов по формуле (4) необходимо выбрать экспериментально обоснованный механизм возникновения сильного электрического поля у катода. В литературе указанное поле связывают либо с полем отдельного иона, подлетающего к катоду, или микронеровностями на поверхности последнего, либо с пространственными зарядами.

Источник свободных электронов и механизм их генерации

У автора теории дуги, основанной на термической ионизации газа [1], достаточно хорошо изученная область тлеющего свечения заменена гипотетическим ионизационным пространством. Существование названного пространства (термической ионизации) требует выполнения условия равновесности газа, отвечающего принципу детального равновесия. Газовый разряд может быть стационарным, однако не является равновесным, особенно в катодной области. Поскольку существование ионизационного пространства не имеет ни строгого теоретического, ни экспериментального подтверждения, то мы не будем его рассматривать.

Экспериментально установленным [3, 4] является факт перехода тлеющего разряда в дугу при уменьшении внешнего сопротивления электрической цепи. Такой переход свидетельствует о том, что в тлеющем разряде присутствуют все процессы, необходимые для зажигания дуги. В тлеющем разряде генерация свободных носителей заряда в катодной области происходит за счет двух механизмов: эмиссии электронов из катода и ионизации газа этими электронами в области тлеющего свечения. Более вероятно, что в дуге реализуются те же, но многократно усиленные механизмы.

Таким образом, в тлеющем разряде источником свободных электронов является катод, и это неудивительно. Металлический катод представляет собой почти неограниченный источник электронов ($n = 10^{28}$ м$^{-3}$) по сравнению с газом. Такое количество электронов газ (пар) мог бы обеспечить при давлении $p \approx 10^{28} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 2 \cdot 10^{3} \approx \approx 3 \cdot 10^{3}$ атм над расплавленным металлом. Это значение существенно превышает опытные данные.

Кроме того, эмиссия электронов из катода является энергетически более выгодным механизмом по сравнению с ионизацией, т. к. энергия выхода металлов меньше энергии ионизации молекул.

Таким образом, выбор катода в качестве источника свободных электронов в катодной области дуги является более обоснованным по сравнению с термической ионизацией.

В теории катодной области тлеющего разряда ионизация газа в области тлеющего свечения происходит за счет энергии, которую электроны, эмитированные из катода, приобретают в электрическом поле. Следовательно, в катодной области дуги ионизация молекул также происходит за счет энергии электрического поля. В данном случае не требуется выполнения условия равновесности системы, необходимым и достаточным является условие стационарности.

Возникновение поля объемного заряда и автоэлектронная эмиссии из «холодного» катода

В начале 30-х гг. прошлого столетия в [9] был предложен автоэлектронный механизм перехода тлеющего разряда в дуговой. По представлениям автора в аномальном тлеющем разряде отдельные участки поверхности катода под влиянием сильного поля способны эмитировать электроны. При этом плотность электронного тока достаточна для заметной ионизации газа в катодной области. Это приводит к повышению кон-

центрации свободных носителей с разноименными зарядами в области активных участков катода. Вследствие большей подвижности электроны быстрее ионов покидают названные участки, что приводит к увеличению плотности положительного объемного заряда, напряженности поля и усилению автоэлектронной эмиссии. В результате реализуется взаимное усиление электронной эмиссии и объемного заряда.

Автор [9], предполагая известными значения катодного падения и плотностей электронного и ионного токов, получил выражение для напряженности поля объемного заряда у поверхности катода. Для случая, когда все катодное падение реализуется на одной длине свободного пробега иона, формула, полученная автором в системе СГС, имеет следующий вид:

$$E^2 = \frac{16 \cdot \pi}{\sqrt{2 \cdot e}} \cdot \left(j_+ \cdot \sqrt{m_+} - j_e \cdot \sqrt{m_e} \right) \cdot \sqrt{U_к} \,, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля, В/см; e – заряд электрона; $U_к$ – падение потенциала на длине свободного пробега (катодное падение); m_+, m_e – массы покоя иона и электрона соответственно; j_+, j_e – плотности ионного и электронного токов соответственно, А/см^2.

Вынеся в формуле (5) массу электрона за скобки, массу иона, выразив через относительную атомную массу A и атомную единицу массы, и, объединив комбинацию постоянных величин в одну постоянную, получим следующее выражение:

$$E^2 = C \cdot \left(j_+ \cdot 42,7 \cdot \sqrt{A} - j_e \right) \cdot \sqrt{U_к} \,, \quad (6)$$

где C – постоянная, $C = 16 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_e}{2 \cdot e}}$.

Из выражения (6) следует, что напряженность поля зависит как от катодного напряжения, так и от массы иона и соотношения между ионным и электронным токами. Причем напряженность поля растет с увеличением как ионного тока, так и массы атома (в рассматриваемом случае атома катода).

В формуле (6) вынесем плотность тока за скобки и оценим вклад электронного и ионного токов в напряженность поля. В большинстве литературных источников отношение электронной и ионной компонентов разрядного тока в катодной области лежит в пределах от 2 до 10. Выбрав в качестве катода алюминиевый электрод (A = 27), получим, что с точностью 1 %...2 % электронным током в выражении (6) можно пренебречь. При этом рассматриваемая погрешность будет уменьшаться при переходе к более тяжелым металлам.

С учетом последнего формула для напряженности электрического поля пространственного заряда в катодной области в международной системе единиц примет следующий вид:

$$E = 5,7 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{j_+} \cdot \sqrt[4]{A \cdot U_к} \,. \quad (7)$$

Таким образом, напряженность электрического поля пространственного заряда в катодной области в большей степени определяется ионным током.

В [10] при исследовании перехода тлеющего разряда в дугу в воздухе при давлениях 50...1300 мм рт. ст. было установлено существование одной и той же при всех давлениях критической напряженности поля 10^6 В/см, при которой происходит указанный переход. Это можно считать опытным подтверждением рассматриваемого механизма. К опытному подтверждению модели также можно отнести факт существования порогового значения тока, при котором тлеющий разряд переходит в дугу, установленный в [11–13]. При этом для металлов с высокой температурой кипения пороговый ток оказывается в общем больше, чем для металлов с низкой температурой. Кроме того, при большей

плотности среды для рассматриваемого перехода требуются более низкие значения тока. Отметим, что указанные работы проводились до 1940 г. Из последних обзорных работ, посвященных электрической дуге, можно отметить [14].

Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги при атмосферном давлении

На основании приведенных данных можно предложить следующую обобщенную модель процессов в области холодного катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении.

Механизмы генерации свободных носителей и возникновения области ионизации заключаются в следующем.

Электроны, вылетевшие из катода, пролетают без столкновений расстояние, равное длине свободного пробега λ ($\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м при давлении 10^5 Па). К концу свободного пробега они приобретают в электрическом поле катодного падения потенциала ($U \approx 8...10$ В) кинетическую энергию, равную $E_к \approx 8...10$ эВ. В конце свободного пробега электроны сталкиваются с частицами газа (пара). Если энергия ускоренного электрона равна или больше энергии ионизации частиц газа, то происходит их ионизация. В результате возникает область ионизации (тлеющего свечения). В этой области возникают свободные носители заряда – положительный ион и электрон. Точнее ион и два электрона – вылетевший из катода и вызвавший ионизацию, и возникший в результате ионизации.

Рассмотрим механизмы возникновения электрического поля пространственных зарядов и электронной эмиссии из катода.

Электрон, вызвавший ионизацию и возникший в результате ионизации, будучи легче иона, достаточно быстро удаляется из области ионизации в сторону анода. Ионы же в момент возникновения имеют небольшую тепловую скорость, равную скорости нейтральных атомов. Поэтому на расстоянии от катода, равном длине свободного пробега электрона, возникает область, в основном заряженная положительно.

Электроны вылетают из катода с небольшой скоростью и создают слой отрицательного заряда в непосредственной близости от катода.

Таким образом, в катодной области возникают два разноименно заряженных электрических слоя, которые эмитируют свободные, разноименно заряженные носители. Так как эти слои расположены на расстоянии свободного пробега, то можно говорить о «вакуумном диоде с двумя эмиттерами». Электрическое поле положительного объемного заряда, расположенного близко к катоду, может вызвать усиление автоэлектронной эмиссии из последнего. Напряженность этого поля можно вычислить с помощью выражения (7).

Из области ионизации ионы вытягиваются электрическим полем катодного падения потенциала и бомбардируют катод, отдавая ему энергию, приобретенную в электрическом поле. Электроны же двигаются в электрическом поле из области ионизации к аноду и ионизируют газ в положительном столбе.

Увеличение плотности разрядного тока, например, уменьшением балластного сопротивления цепи, приводит к разогреву катода, увеличению плотности его паров, ионизации металлического пара, нейтрализации объемного отрицательного заряда и усилению термоавтоэлектронной эмиссии. Перечисленные процессы приводят к лавинообразному нарастанию разрядного тока, ограниченного лишь сопротивлением электрической цепи.

Результаты моделирования и их обсуждение

Значения напряженности электрического поля у катода и плотности электронного тока можно оценить совместным решением выражений (7) и (4).

Ниже приведены результаты расчетов для стального катода. Целью расчетов является оценка пригодности выбранных выражений для описания сварочного тока. Чтобы привязать расчеты к экспериментальным данным, начальное значение ионного тока принято меньшим критического (порогового) тока перехода от тлеющего разряда к дуговому разряду, равного $I_{кр} \approx 14$ А/см^2 [11].

На рис. 2 приведен график зависимости напряженности электрического поля у стального катода от плотности ионного тока при катодном напряжении, равном $U_к$ = 10 В и температуре T = 2500 К.

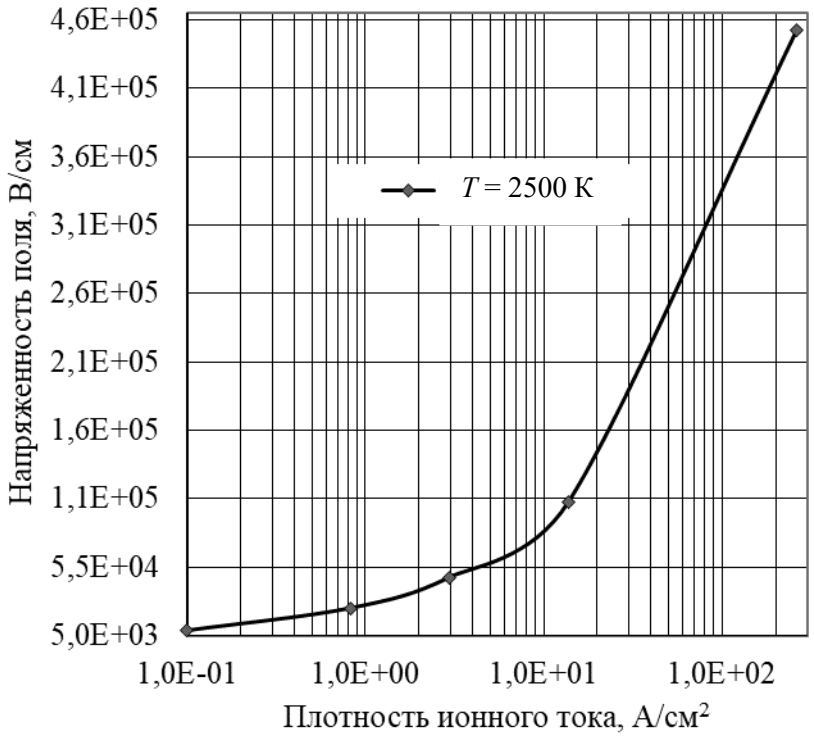


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля у стального катода от плотности ионного тока при температуре T = 2500 К

Из анализа графика следует, что после достижении током критического значения 14 А/см^2 наблюдается лавинообразное нарастание напряженности поля и ионного тока.

Значения напряженности поля по порядку величины совпадают со значением, вычисленным для случая, когда катодное падение потенциала сосредоточено на расстоянии, равном длине свободного пробега λ:

$$E_к = \frac{U_к}{\lambda} = \frac{10}{5 \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

На рис. 3 приведен график зависимости плотности тока термоавтоэлектронной эмиссии из стального катода от плотности ионного тока при температуре T = 2500 К.

Из рис. 3 следует, что при значениях ионного тока, превышающих указанное выше критическое значение, наблю-

дается лавинообразное нарастание разрядного тока вплоть до 10^6 А/см^2. Это соответствует опыту. Поэтому можно считать, что совместное решение выражений (7) и (4) для описания тока сварочной дуги является вполне приемлемым. Для получения более корректных результатов при расчетах следует учитывать наличие ограничений, определяемых технологическими требованиями сварки. Дальнейшая работа должна состоять в проверке рассмотренной обобщенной модели процессов в катодной области сварочной дуги на соответствие балансу энергии и получении самосогласованной системы уравнений.

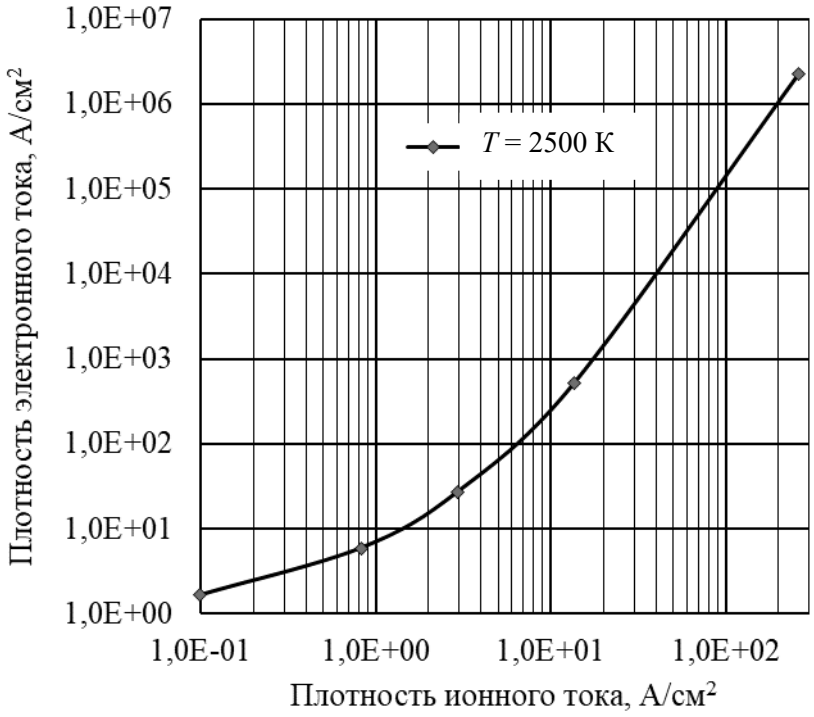


Рис. 3. Зависимость плотности тока термоавтоэлектронной эмиссии из стального катода от плотности ионного тока при температуре $T = 2500$ К

Заключение

1. На основе известных экспериментальных данных рассмотрена обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги при атмосферном давлении. Обобщенная модель базируется на следующих представлениях: источником свободных электронов является металлический катод сварочной дуги; электроны покидают «холодный» катод в результате действия электрического поля пространственных зарядов и нагрева; генерация свободных носителей заряда в газе происходит в результате ионизации за счет энергии электрического поля.

2. Обобщенная модель может объяснить большие значения разрядного тока в случае «холодных» катодов. Результаты оценочных расчетов тока дуги со стальным катодом при температуре $T = 2500$ К близки к известным опытным данным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Slepian, J.** Theory of current transference at the cathode of an Arc / J. Slepian // Phys. Rev. – APS. – 1926. – № 27. – P. 249.

2. **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – Москва: Машиностроение, 1970. – 336 с.

3. **Энгель, А.** Физика и техника электрического разряда в газах: в 2 т. / А. Энгель, М. Штенбек. – Москва: ОНТИ, 1935. – Т. 1. – 252 с.

4. **Кесаев, И. К.** Катодные процессы электрической дуги / И. К. Кесаев. – Москва: Наука, 1968. – 244 с.

5. **Грановский, В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – Москва: Наука, 1971. – 526 с.

6. **Райзер, Ю. П.** Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.

7. **Ляпин, А. И.** О термической ионизации и температуре сварочной дуги / А. И. Ляпин // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 140.

8. **Fowler, R. H.** Electron emission in intense electric fields / R. H. Fowler, L. W. Nordheim // Proc. Roy. Soc. – London, 1928. – Vol. 119. – P. 173–181.

9. **Mackeown, S. S.** Cathode drop in arc discharges / S. S. Mackeown // Electrical Engineering. – A. I. E. E. – 1932. – Vol. 51, № 6. – P. 386–388.

10. **Boyle, W. S.** Glow-to-Arc Transition / W. S. Boyle, F. E. Haworth // Phys. Rev. – APS. – 1956. – Vol. 101, № 3. – P. 935–938.

11. **Mackeown, S. S.** Reignition of an arc at low pressures / S. S. Mackeown, J. D. Cobine, F. W. Bowden // Electrical Engineering. – A. I. E. E. – 1934. – Vol. 53, № 7. – P. 1081.

12. **Plesse, H.** Untersuchungen am elektrischen Lichtbogen / H. Plesse // Annalen der Physic. – 1935. – Vol. 414, № 5. – P. 473–499.

13. **Suits, C. G.** Role of Oxidation in Arc Cathodes / C. G. Suits, J. P. Hocker // Phys. Rev. – A. P. S. – 1938. – Vol. 53. – P. 670.

14. **Makhlin, N. M.** Processes occurring at excitation of the welding arc (Review) / N. M. Makhlin // Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding). – 2020. – № 9. – P. 54–60.

Статья сдана в редакцию 12 января 2024 года

Контакты:
ali_lyapin@tut.by (Ляпин Али Ибрагимович).

A. I. LYAPIN

GENERALIZED MODEL OF ELEMENTARY PROCESSES IN THE «COLD» CATHODE REGION OF A WELDING ARC IN VAPOR AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Abstract

A generalized model of elementary processes in the «cold» cathode region of the welding arc is based on known experimental data obtained while studying the transition from a glow discharge to an arc discharge. The ideas that form the basis of this model are as follows: the source of free electrons is the metal cathode of the welding arc; electrons leave the «cold» cathode as a result of the action of the electric field of space charges and heating; the generation of free charge carriers in the gas occurs as a result of ionization due to the energy of the electric field. It is shown that the generalized model can explain large values of the discharge current in the case of «cold» cathodes. The results of estimated calculations of the arc current with a steel cathode at a temperature of $T = 2500$ K are close to the known experimental data.

Keywords:

welding arc, «cold» cathode, cathode region, elementary processes, generalized model of processes.

For citation:

Lyapin, A. I. Generalized model of elementary processes in the «cold» cathode region of a welding arc in vapor at atmospheric pressure / A. I. Lyapin // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 108–117.

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-118-126

УДК 656.078

С. А. АЛЕКСАНДРОВА
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ SCOR ДЛЯ ОЦЕНКИ РОЛИ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПОСРЕДНИКОВ В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК

Аннотация

Показана актуальность и необходимость мониторинга и аналитики цепи поставок для обеспечения ее эффективной работы. На примере операционной модели SCOR отображена роль логистических посредников для управления материальными и информационными потоками в цепи поставок. Структурированы отдельные логистические операции в бизнес-процессах модели SCOR и показаны зоны ответственности и влияния логистических операторов в цепи поставок. Выполненная структуризация позволит повысить качество взаимодействия логистических и остальных звеньев цепи и усовершенствовать ее работу благодаря логистическому управлению.

Ключевые слова:
цепь поставок, управление цепями поставок, SCOR-модель, бизнес-процесс, логистический оператор.

Для цитирования:
Александрова, С. А. Использование операционной модели SCOR для оценки роли и управления работой логистических посредников в цепях поставок / С. А. Александрова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 118–126.

Введение

Управление бизнесом подразумевает осознанное принятие решений, которое невозможно без аналитического подхода. Достаточная информационная база для принятия решений, мониторинг в процессе их реализации, а также анализ результатов постфактум позволяют добиться максимальной эффективности функционирования бизнеса, своевременно вносить коррективы в текущую деятельность, разрабатывать и поддерживать стратегию развития бизнеса. Современный бизнес – это неизолированное предприятие (организация), которое заботится только о своем собственном благополучии, полностью управляет всеми бизнес-процессами и получает результат исключительно за счет своих усилий. Современная концепция бизнеса – это сложные многочисленные хозяйственные связи, специализация и кооперация, усилия многих для успеха всех.

В сфере материального производства непосредственно производство продукции и последующее доведение ее до конечного потребителя подразумевает взаимодействие большого количества бизнес-структур – из сферы производства, сервиса, логистики, торговли и формирование иногда очень сложных цепей поставок. Именно за счет эффек-

© Александрова С. А., 2024

тивной и скоординированной работы всех участников бизнес-процессов достигается конечная цель – эффективное использование ресурсов бизнеса при удовлетворении запросов и потребностей потребителей. При этом эффективная и скоординированная работа невозможна без информационного и аналитического взаимодействия участников цепи поставок, особое место среди которых занимает логистическое звено. Понимание роли логистических посредников в цепи, структурирование их задач и координация выполняемых функций будут способствовать эффективной работе всей цепи поставок. С этой целью важно аналитически грамотно подходить к управлению цепью поставок как в рамках общих задач, так и с позиции отдельных функциональных звеньев цепи, в частности логистических.

Основная часть

Современный подход к эффективному функционированию и развитию бизнеса состоит в интеграции отдельных организаций, создании устойчивых, эффективных и адаптивных цепей поставок. Комплексное управление всеми организациями и структурами, входящими в цепь поставок, на основе взаимного сотрудничества, построения эффективных сквозных бизнес-процессов позволит сформировать ценность на рынке, что, в свою очередь, обеспечит всем участникам цепи конкурентное преимущество и успех на рынке.

Таким образом, для достижения поставленных целей в цепи поставок ставятся связанные аналитические задачи (рис. 1).

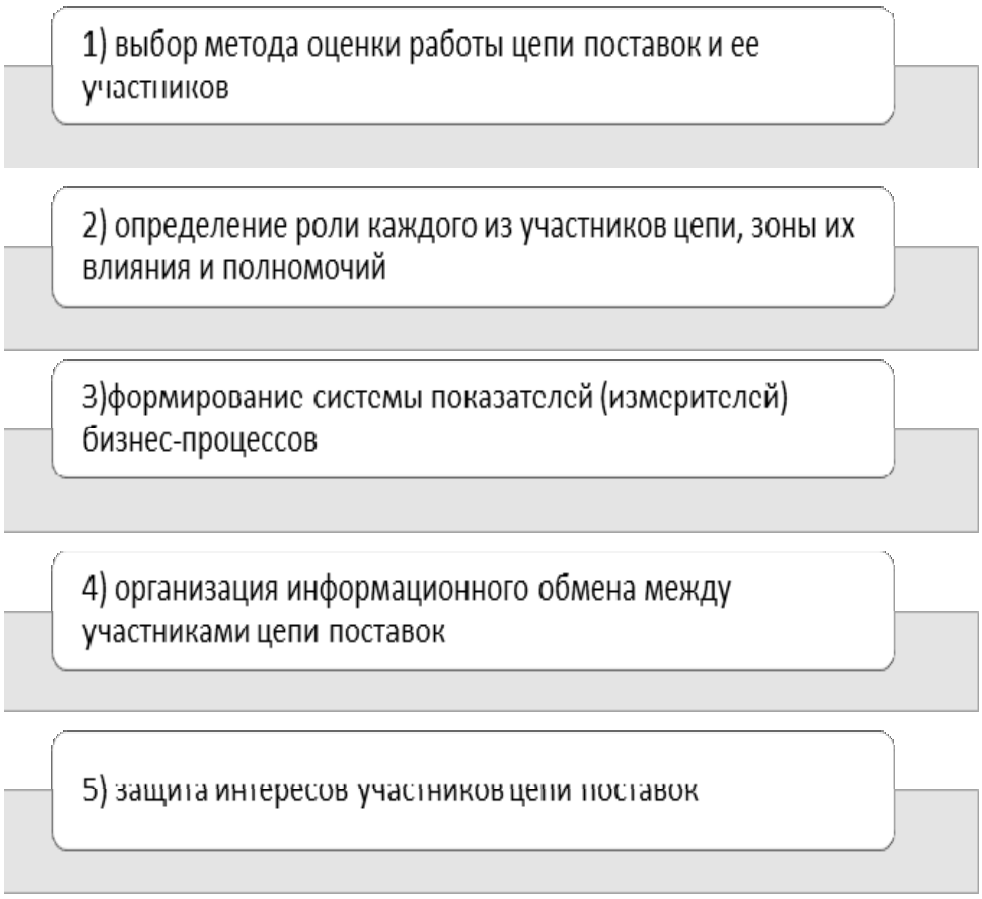


Рис. 1. Аналитические задачи цепи поставок

Организации, непосредственно входящие в цепи поставок, по виду деятельности и выполняемым функциям можно укрупненно разделить на:

- производственные;
- торгово-распределительные;
- сервисные.

В составе сервисных участников цепи поставок особую роль играют логистические операторы. Они являются ключевым звеном в цепи поставок предприятий-производителей и, используя свой опыт, ресурсы и технологии, способствуют оптимизации бизнес-процессов, улучшению эффективности и удовлетворению потребностей клиентов. Их роль в цепи поставок сложно переоценить – удаленность, разобщенность и узкая специализация производителей, диверсифицированные и удаленные рынки сбыта, многообразие способов доставки делают логистическую отрасль практически обязательной и очень значимой частью цепи поставок. Так, по оценкам экспертов, затраты на логистику могут составлять от 10 % до 30 % от стоимости товара [1] и в последние годы имеют тенденцию к росту в связи с увеличением рисков ввиду высокой неопределенности, роста тарифов и расстояний. Некоторые хозяйственные связи становятся неустойчивыми или даже невозможными без участия опытного логистического звена.

Успешное взаимодействие участников цепи поставок, построенное на понимании общих и частных целей, является критичным для работы цепи. Частными целями цепи поставок являются цели отдельных участников; общей целью – создание итоговой ценности и доведение ее до потребителя с соблюдением заданных критериев. Мониторинг и достижение поставленных целей невозможны без адекватной аналитики. При этом важно рассматривать частные цели через призму общих интересов.

Такой подход можно продемонстрировать на примере одной из ключевых моделей управления цепями поставок и с позиции участников цепи поставок, отвечающих за логистические функции, как вариант решения двух аналитических задач цепи поставок – выбор метода и позиционирование участника цепи поставок, его роли и зоны ответственности.

Для оценки работы цепи поставок разработаны разные методы и модели, среди которых наибольшее распространение получила модель SCOR, которая на сегодняшний день признается в качестве международного межотраслевого стандарта при планировании и управлении цепями поставок [2].

SCOR (Supply Chain Operations Reference) – операционная модель управления цепями поставок, определяющая, какие бизнес-процессы и каким образом должны быть реализованы для описания и анализа процессов в цепи поставок и достижения наилучших показателей эффективности внутри цепи управления поставками.

SCOR относится к классу процессно-ориентированных моделей. Она рассматривает цепочку поставок не как общность вовлеченных в нее организаций, а как цепь взаимосвязанных процессов, которые могут происходить как внутри одной компании, так и вне нее. SCOR-модель охватывает все аспекты взаимодействия с потребителями (от заказа до выставления счета), все трансакции (от поставщиков до потребителя), а также все рыночные взаимодействия (от понимания общих потребностей до исполнения конкретных заказов). Границы модели определяются «от поставщиков поставщика до клиентов потребителя», т. е. модель описывает так называемую «расширенную» цепь поставок [2, 3].

SCOR-модель включает ряд ключевых процессов (рис. 2).

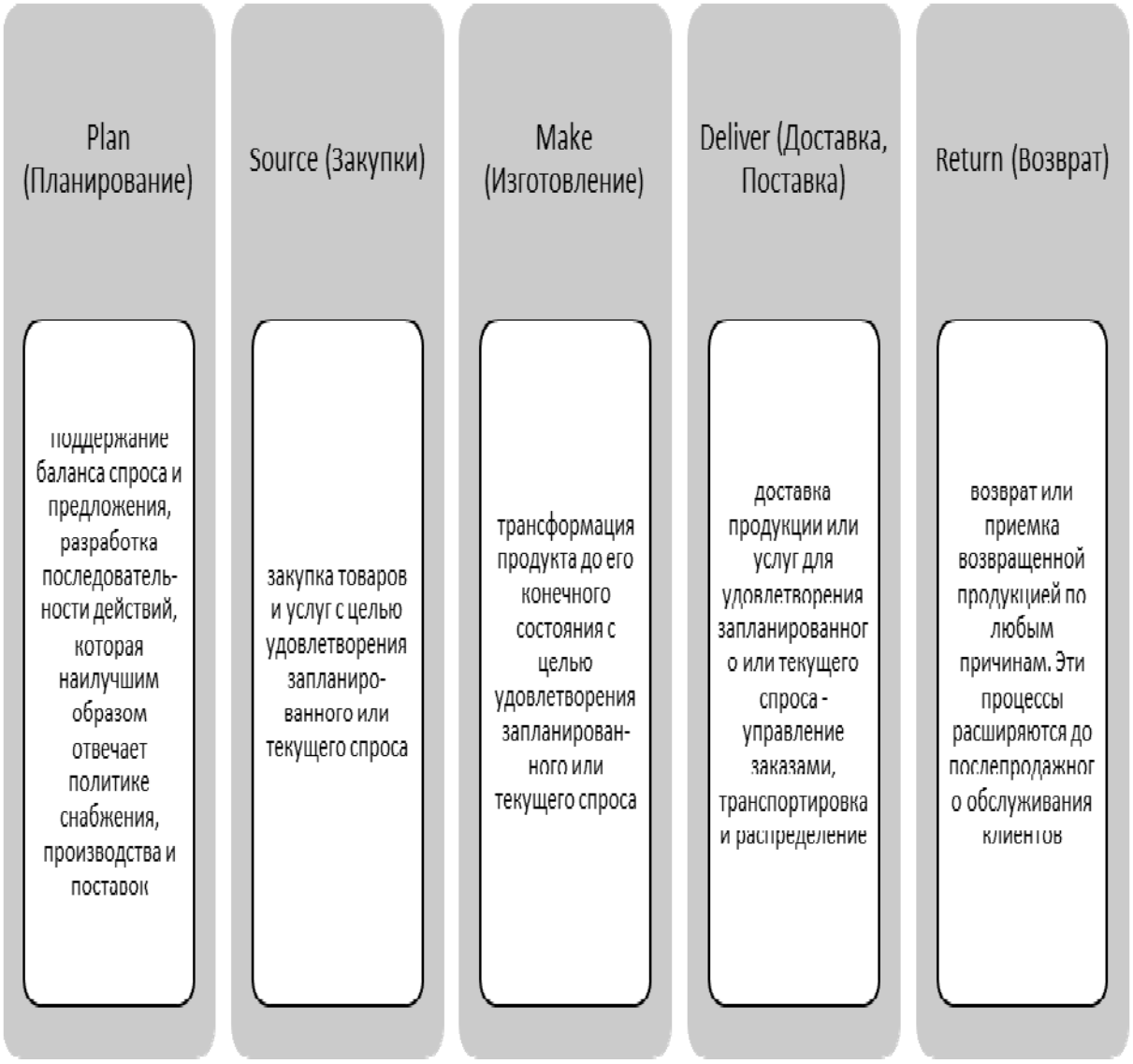


Рис. 2. Ключевые процессы операционной модели управления цепями поставок SCOR

В рамках SCOR-модели описываются ключевые процессы, дается характеристика последовательности и взаимосвязи процессов (по информационным потокам), а также предлагаются показатели для оценки реализации отдельных операций и процедур и сравнительного бенчмаркинга.

Понимание и четкое определение роли отдельных организаций в цепи поставок важно для комплексного управления всей цепочкой. Для оценки роли логистических посредников целесообразно представить управленческие и организационные процессы цепи поставок по основным видам логистических потоков – материальным и информационным (табл. 1).

Табл. 1. Управление материальными и информационными потоками в цепи поставок по бизнес-процессам модели SCOR

Организация и управление	
материальными потоками	информационными потоками
1. Планирование (Plan)	
Прогнозирование спроса на товары и услуги	Обмен информацией о спросе и прогнозах развития рынка, поставках и продажах между разными уровнями цепи поставок, включая производство, закупки и логистику
Определение потребности в сырье, компонентах и готовой продукции на основе прогнозов спроса и стратегических планов бизнеса	Обмен данными между участниками цепи для создания операционных планов, включая планы производства и запасов
Разработка операционных планов для оптимизации входящих и исходящих материальных потоков в цепи поставок	Использование современных технологий для анализа данных и моделирования ключевых процессов
2. Закупки (Source)	
Поиск, формирование критериев выбора и выбор поставщиков для сырья и компонентов	Обмен информацией о наличии товаров, ценах и условиях поставки с поставщиками
Разработка условий поставки и заключение контрактов, организация закупок	Обмен заказами, включая автоматизированный, обмен подтверждениями и статусами поставок
Контроль качества поставок и управление связями с поставщиками	Мониторинг и отслеживание производственных данных и информации о поставках
3. Изготовление (Make)	
Производственный процесс преобразования сырья и компонентов в конечные товары или услуги	Передача данных о состоянии производства, включая производственные планы, процессы и прогресс выполнения заказов
Управление производственными процессами, включая планирование производства, управление запасами и контроль качества	Использование систем управления производством для синхронизации операций и координации рабочих процессов
Оптимизация производственных мощностей и процессов	Обмен информацией о качестве и контроле производства
4. Доставка (Deliver)	
Управление складированием и запасами товаров	Обмен информацией о складских запасах, готовности к отгрузке и планах доставки
Организация транспортировки и логистики от производства до конечных потребителей	Отслеживание статуса заказов и информирование клиентов о доставке
Обеспечение качественной – своевременной и эффективной – доставки заказов	Использование систем отслеживания грузов и транспортной логистики для обеспечения прозрачности в пути следования товаров
5. Возвраты (Return)	
Обработка возвратов от клиентов	Обмен информацией о возвратах, включая причины возвратов и состояние возвращенных товаров
Управление обратными материальными потоками – переработка, ремонт или утилизация возвратов	Планирование и координация обратных логистических процессов с использованием данных о возвратах
Оптимизация процессов обработки возвратов для минимизации воздействия на цепь поставок	Внесение информации в системы управления запасами и инвентаризация

Описывая материальные потоки в рамках бизнес-процессов модели SCOR, бизнес может более детально понимать и оптимизировать свои логистические операции в целях повышения эффективности и улучшения обслуживания клиентов.

Информационные потоки в цепи поставок играют ключевую роль в обеспечении прозрачности, координации и эффективного управления всей цепью поставок. Они направлены на обеспечение своевременного и точного обмена данными между участниками цепи поставок, что, в свою очередь, способствует более эффективной координации и управлению всей цепочкой.

Управленческая задача логистического звена формируется преимущественно вокруг технико-технологических операций с материальными потоками, которые включают главным образом транспортные, складские и документальные операции. Их грамотное проведение является основой координированной и экономичной работы цепи поставок.

Основные организационно-технологические операции вышеописанных групп, выполняемые логистическими посредниками, сгруппированы по бизнес-процессам SCOR и представлены в табл. 2.

Табл. 2. Технологические операции логистического оператора в цепи поставок согласно модели SCOR

Обслуживание цепи поставок логистическими посредниками		
Транспортные операции	Складские операции	Документальное сопровождение
1. Планирование (Plan)		
Маршрутизация. Предполагает определение оптимальных видов транспорта, построение маршрутов для транспортировки товаров от точки производства до конечного потребителя	Управление запасами. Определение оптимальных уровней запасов для обеспечения спроса, загрузки мощностей и предотвращения дефицитов или излишков	Прогнозы спроса. Расчеты и прогнозы состояния рынка и объема спроса, планы продаж товаров и услуг
Графики доставки. Разработка графиков доставки с учетом спроса, величины запасов, тарифов и условий доставки и др.	Планирование загрузки мощностей, графиков работы и простоев. Оптимизация использования всех видов складских ресурсов	Операционные планы. Документы, определяющие стратегические и текущие цели и задачи, планы поставок, производства, реализации и запасов
2. Закупки (Source)		
Работа с поставщиками. Выбор поставщиков с учетом их географического расположения, транспортного обеспечения поставки. Организация транспортировки своими силами или с привлечением сторонних ресурсов	Приемка сырья и компонентов. Регистрация поступления сырья и компонентов на склад и их размещение с соблюдением норм и особенностей	Документы, формализующие условия сотрудничества с поставщиками
Управление заказами. Отправка заказов поставщиками и мониторинг их статуса и поставок	Хранение сырья и компонентов с соблюдением требований и норм	Контракты и соглашения. Заказы на поставку и для закупки сырья и компонентов у поставщиков. Платежные документы

Окончание табл. 2

Обслуживание цепи поставок логистическими посредниками		
Транспортные операции	Складские операции	Документальное сопровождение
3. Изготовление (Make)		
Транспортировка сырья и компонентов на производственные площадки	Складирование и хранение готовой продукции перед её отправкой	Технологические карты и другие документы, описывающие процессы производства и технологии изготовления товаров
Транспортировка готовой продукции от производственных площадок к складам и дистрибьюторам	Подготовка товаров к отправке, включая упаковку, маркировку и т. п.	Заказы на производство и другие документы, инициирующие процессы производства и указывающие требования к изготовлению товаров
4. Доставка (Deliver)		
Транспортировка товаров от производства до центров дистрибуции и складов согласованными транспортными средствами по согласованным маршрутам в установленные сроки	Обработка заказов. Сборка, упаковка и отгрузка заказов в соответствии с договорами и заявками клиентов	Уведомления о доставке. Документы, информирующие клиентов о предстоящей доставке и содержащие информацию о заказанных товарах
Последняя миля. Доставка товаров от складов до конечных потребителей	Управление запасами на последней миле. Оптимизация запасов и операций на последнем участке цепи поставок перед доставкой клиентам	Транспортные и платежные документы. Документы, сопровождающие грузы в процессе доставки и используемые для финансового учета
5. Возвраты (Return)		
Организация транспортировки возвращенных товаров от потребителей к складам или производственным площадкам	Прием и обработка возвращенных товаров, их переработка, ремонт или утилизация	Заявки на возврат. Документы, заполняемые клиентами при возвращении товаров
		Акты об утилизации или ремонте. Документы, описывающие процессы обработки возвращенных товаров

Транспортные операции в рамках бизнес-процессов SCOR охватывают все этапы цепи поставок, начиная от снабжения и закупок сырья до доставки готовой продукции и обратной логистики. Эти операции направлены на обеспечение эффективности и своевременности транспортировки, минимизацию затрат и оптимизацию логистических процессов.

Складские операции в SCOR-модели направлены на обеспечение эффективного управления запасами, минимизацию издержек, повышение скорости обработки заказов и обеспечение высокого уровня обслуживания клиентов. Они играют важную роль в общей цепи поставок, создавая баланс между предложением и спросом.

Документальное сопровождение включает создание, обработку и обмен различными видами документов, необходимых для эффективного функционирования цепи поставок. Эти документы помогают отслеживать и контролировать различные этапы бизнес-процессов и обеспечивают прозрачность операций.

На основе оценки операций по управлению потоками в цепях поставок можно определить значимость и выделить зоны ответственности, на которых должны концентрироваться усилия логистических звеньев цепи.

В табл. 3 обобщены основные процессы SCOR-модели, которые могут

быть применимы к логистическому посреднику, а также сфера его управленческого влияния для каждого из процессов.

Табл. 3. Роль логистического оператора в цепи поставок согласно модели SCOR

Зона ответственности и функции логистического оператора в цепи поставок	Влияние логистического оператора на функционирование цепи поставок
1. Планирование (Plan)	
Планирование потребностей клиентов и управление спросом	Логистический оператор может предоставить информацию о прогнозировании спроса и оценке логистических возможностей, что поможет предприятиям-производителям оптимизировать свои планы производства и поставок
Разработка стратегий логистики и управление рисками	
Оптимизация запасов и прогнозирование спроса	
2. Закупки (Source)	
Выбор поставщиков и установление партнерских отношений	Посредством партнерств с надежными поставщиками и оптимизацией процессов закупок логистический оператор может помочь предприятиям-производителям обеспечить надежные поставки сырья и компонентов вовремя
Управление поставками и поиск оптимальных поставщиков	
Оценка и выбор альтернативных поставок	
3. Изготовление (Make)	
Оптимизация производственных процессов, если логистический посредник также выполняет функции производства или сборки товаров	Логистический оператор может внести вклад в оптимизацию процессов производства предприятий-производителей путем эффективной организации транспортировки сырья и компонентов на производство
Управление качеством и производственными процессами	
4. Доставка (Deliver)	
Управление логистикой доставки: маршрутизация, упаковка, складирование и доставка товаров клиентам	Логистический оператор играет ключевую роль, обеспечивая эффективную и своевременную доставку готовой продукции до конечных потребителей или в центры распределения
Оптимизация транспортной логистики и управление складскими операциями	
5. Возвраты (Return)	
Управление обработкой возвратов и восстановление товаров	Логистический оператор может помочь предприятиям-производителям оптимизировать процессы обработки возвратов, упростить возвратную логистику и повысить эффективность управления возвращенными товарами
Разработка процессов обработки возвратов и утилизации товаров	

Заключение

Структурирование задач логистического оператора по отдельным бизнес-процессам модели анализа и управления цепями поставок SCOR представляет собой базовый этап адаптации модели под потребности и задачи одного из функциональных участников цепи. Следующим этапом проектирования SCOR-модели с позиции логистического оператора и его роли в цепи поставок должны быть:

– формирование конкретных ключевых показателей эффективности (KPI) для отслеживания и оценки конкретных процессов;

– формирование объема, структуры и границ данных, необходимых для расчета и мониторинга KPI;

– разработка схемы и процедуры обмена информацией между логистиче-

ским и другими звеньями цепи поставок;

– обеспечение информационной безопасности участников цепи поставок и защита коммерческих данных от несанкционированного доступа.

В результате повышения вовлеченности в управление логистического звена повысится качество и скорость работы цепи поставок, что, в свою очередь, позволит:

– снизить затраты и повысить эффективность управления материальными и информационными потоками за счет оптимизации процессов хранения, управления запасами, транспортировки и доставки товаров;

– повысить управляемость, прозрачность и качество работы цепи поставок за счет агрегирования данных, системы обмена информацией, текущего мониторинга и аналитики всех бизнес-процессов;

– повысить адаптивность производителей за счет гибкости и масштабируемости логистических операций;

– улучшить обслуживание клиентов за счет предоставления точной и своевременной информации о доставке товаров, своевременной доставки, оптимизации логистических процессов и обеспечения высокого уровня обслуживания и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логистика экспортной деятельности [Электронный ресурс] // Школа экспорта Российского экспортного центра. – Режим доступа: https://exportedu.ru/education/organizaciya-eksportnoy-deyatelnosti-rossiyskih-predpriyatiy/logistika-v-exportnoi-deyatelnostiю. – Дата доступа: 08.01.2024.

2. **Левина, Т. В.** SCOR-моделирование [Электронный ресурс] / Т. В. Левина // Логистика и управление цепями поставок. – 2012. – № 2 (49). – С. 88–94. – Режим доступа: http://www.lscm.ru/index.php/ru/publicly/item/801-scor-%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2% D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5. – Дата доступа: 10.01.2024.

3. **Сергеев, В. И.** Управление цепями поставок: учебник для вузов / В. И. Сергеев. – Москва: Юрайт, 2023. – 480 с.

Статья сдана в редакцию 18 января 2024 года

Контакты:
sv.a.alexandrova@yandex.by (Александрова Светлана Александровна).

S. A. ALEKSANDROVA

USING THE SCOR OPERATING MODEL TO ASSESS THE ROLE AND MANAGE THE PERFORMANCE OF LOGISTICS INTERMEDIARIES IN SUPPLY CHAINS

Abstract

The article shows the relevance and need for monitoring and analytics of the supply chain to ensure its effective performance. The role of logistics intermediaries for managing material and information flows in the supply chain is shown using the SCOR operating model as an example. Individual logistics operations in the business processes of the SCOR model are structured and the areas of responsibility and influence of logistics operators in the supply chain are shown. The structuring done will raise the quality of interaction between logistics and other links in the chain and improve its performance thanks to logistics management.

Keywords:

supply chain, supply chain management, SCOR model, business process, logistics operator.

For citation:

Aleksandrova, S. A. Using the SCOR operating model to assess the role and manage the performance of logistics intermediaries in supply chains / S. A. Aleksandrova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 118–126.

ВЕСТНИК
БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1(82) 2024

Ответственный за выпуск	И. В. Брискина
Оформление обложки	В. П. Бабичева
Дизайн и компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 332, 212022, г. Могилев. Телефон: 71-30-54, e-mail: bru@bru.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 15.06.2022.

Подписано в печать . Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 7,94. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.