

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

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Сборник статей I Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 23–24 ноября 2023 года)

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2023

УДК 621.01:001.895

ББК 34.4:72

И66

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М. Е. Лустенков* (гл. редактор); д-р техн. наук, проф. *В. М. Пашкевич* (зам. гл. редактора); канд. техн. наук, проф. *А. А. Жолобов*; канд. техн. наук, доц. *Д. М. Свирепа*; канд. техн. наук, доц. *С. Н. Хатетовский*; канд. техн. наук, доц. *В. М. Шеменков*; *И. В. Брискина* (отв. секретарь)

И66 **Инновационные** технологические системы и процессы в машиностроении: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – 210 с.: ил. ISBN 978-985-492-303-1.

В сборнике материалов конференции рассмотрены вопросы разработки прогрессивных технологических процессов и создания новых материалов в машиностроении и приборостроении, интеллектуальных систем управления качеством и техническим уровнем изделий машиностроения, механизмов для технологической оснастки. Рассмотрены вопросы проектирования, производства и безопасной эксплуатации технологических систем.

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

УДК 621.01:001.895

ББК 34.4:72

ISBN 978-985-492-303-1

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Научное издание

Сборник статей I Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 23–24 ноября 2023 года)

**Авторы несут персональную ответственность
за содержание публикуемых материалов**

Корректоры *И. В. Голубцова, А. А. Подошевка*

Компьютерный дизайн *М. М. Дударева, Е. В. Ковалевская,
Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 09.11.2023. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 12.32. Уч.-изд. л. 13.13. Тираж 30 экз. Заказ № 1200.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

Пленарное заседание	
ЖИГАЛОВ А. Н., БАШАРИМОВ М. В., ЖАРИКОВ А. Н., ЧЕРНЯКОВ Ю. Д., КУБРАКОВ И. В. Инновационная технология получения твердосплавных пластин марки ВУТС.....	9
ПЕТРЕШИН Д. И., ПОЛЬСКИЙ Е. А., ПРОКОФЬЕВ А. А., СКАЧКОВ П. В. Технологическое обеспечение показателей надежности узлов машин на этапах изготовления, испытания и приработки.....	15
ШЕМЕНКОВ В. М., РАБЫКО М. А., ЮМАНОВА А. Н. Технологические аспекты использования тлеющего разряда для упрочнения изделий из инструментальных материалов.....	19
АЛЕКСЕЕВ Ю. Г., КОРОЛЕВ А. Ю., ДАЙ ВЭНЬЦИ Влияние электролитно-плазменной обработки на эксплуатационные характеристики поверхности ультразвукового медицинского волновода.....	24
ВОЛЧЕК О. М. Математическое моделирование силового взаимодействия валков прессы и прессуемой смеси.....	30
ВЫСОЦКАЯ Н. А. Особенности образования гранул минеральных удобрений в агрегатах барабанного типа.....	36
ГРУША В. П., ГУТЕВ А. П., БАРАНОВ К. Н. Инновации в области литья цилиндрических заготовок из антифрикционных силуминов.....	40
ЖАРИКОВ А. Н., ЖИГАЛОВ А. Н., БАШАРИМОВ М. В. Метод локализации негерметичностей в вакуумных системах.....	45
ЗАРЕЦКИЙ В. А., ГУЛЬКОВ Г. И. Моделирование электропривода движения мобильного робота.....	50
ИЛЬЮШИНА Е. В., ЮШКЕВИЧ Н. М. Исследование упрочняющей пневмоударной обработки плоских поверхностей.....	56
КАПИТОНОВ А. В., ЮРКЕВИЧ Б. С., БОЧКАРЕВ С. С., КУРБАННАЗАРОВ А. Ш. Компьютерное моделирование упругих деформаций при проектировании способов обработки деталей с беговыми дорожками.....	62
КЛЯУС О. Н., ЖОЛОБОВ А. А. К вопросу выбора оптимального метода высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием.....	68
КОДНЯНКО М. Ю. Абразивное изнашивание легированных сталей и сплава ВК6.....	74
КОЖЕВНИКОВ М. М., ГАНАК О. Б. Методы автоматизированного проектирования компоновок робототехнических систем.....	80
КУДИНОВ Е. А., ВЛАДИМИРОВ А. А., МАКАРОВ А. В. Исследование влияния амплитуды и частоты вибрационного точения на износ режущего инструмента.....	86
ЛОЗИКОВ И. А. Влияние способов введения модифицирующих лигатур и температуры основы на структуру и свойства бронз.....	91

МИРОНОВА М. Н., ЦАРАНОВ В. В. Алгоритмы управления движением мобильного робота.....	96
МОГУЧЕВА А. А., ГРИНЁВ Д. В., ДМИТРИЕВ С. И., ЕВГЕНЬЕВА Е. А. Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства.....	102
НИКИФОРОВИЧ С. О., АНТОНЮК В. Е., САНДОМИРСКИЙ С. Г. Возможности развития кольцераскатного производства в Беларуси.....	106
ПАШКЕВИЧ В. М., АФАНЕВИЧ В. В., ТЮРИНА А. В. Влияние инерционно-импульсной обработки на микротвердость поверхностного слоя.....	112
ПОЛЬСКИЙ Е. А., ШВЫРЯЕВ М. В., АБРАМОВ Р. В., СУХОВЕЙ В. В. Технологическое обеспечение долговечности формообразующих сборных элементов пресс-форм.....	118
ПОПОК Н. Н., АНИСИМОВ В. С., КОРБА К. В. Динамика процесса резания фрезами с крутонаклонными режущими кромками.....	122
ПОПРУКАЙЛО А. В., КОСТЮКОВИЧ Г. А., КИПНИС М. Е., ОВЧИННИКОВ Е. В., КАЛЫНОВ Д. С. Оптимизация технологии формирования антифрикционных полимерных покрытий деталей шлицевых соединений карданных передач.....	129
ПУМПУР В. А., ДУВАЛОВ П. Ю., АНДРИЕНКО В. М. Методика параметрической идентификации теплообмена при литье детали центробежного дробильно-размольного оборудования.....	136
РАДКЕВИЧ А. А. Микропроцессорное управление асинхронным тяговым электроприводом роботизированного электробуса.....	142
РАДКЕВИЧ А. А., ПАВЛЮКОВЕЦ С. А. Моделирование способа проверки тягового электропривода электробуса по нагреву методом эквивалентного тока.....	148
САВЧИЦ А. В., ШУМЯЧЕР В. М. Оценка свойств абразивного материала и инструмента с использованием комплекса автоматизированных приборов.....	154
СВИРЕПА Д. М. Влияние обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом на шероховатость внутренних цилиндрических поверхностей.....	159
СОРОКИН С. В., ВАСИЛЬЕВА Д. Е., ИГНАТОВА М. С. Разработка автоматизированной системы выбора смазочно-охлаждающих технологических средств.....	163
ТРОЙНИЧ В. А., ГРИДЮШКО Д. В. Уменьшение нагруженности механического соединения резинотканевых лент ленточных конвейеров.....	167
ТРОЙНИЧ В. А., КОДНЯНКО М. Ю. Расчет ветровых нагрузок, действующих на оттяжки буровой установки.....	171
ФЕДОРЕНКО А. М. Структурная оптимизация черновой токарной многопроходной обработки.....	175
ФЕДОСЕНКО А. С., ЛОВШЕНКО Ф. Г., ОЛЕНЦЕВИЧ А. С., АНДРЕЕВ И. К. Перспективы применения механически легированных порошков для производства изделий способами послойного синтеза.....	180

Машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 42–45.

8. **Мошнин, Е. Н.** Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование / Е. Н. Мошнин. – Москва: Машиностроение, 1967. – 272 с.

9. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В. Е. Антонюк. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 190 с.

10. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 3 (52). – С. 28–35.

11. Способ стабилизации формы и размеров маложесткого осесимметричного изделия: пат. BY 23995 / В. Е. Антонюк, В. В. Рудый, В. В. Яворский, С. Г. Сандомирский. – Оpubл. 30.04.2023.

12. **Яворский, В. В.** Технология управляемого охлаждения кольцевых заготовок после кольцераскатки / В. В. Яворский, В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023.

Контакты:

v.javorskij@belaz.minsk.by (Яворский Владимир Васильевич);

vlati@tut.by (Антонюк Владимир Евгеньевич);

sand_work@mail.ru (Сандомирский Сергей Григорьевич).

V. B. YAVORSKI, V. E. ANTONYUK, S. G. SANDOMIRSKI

TECHNOLOGICAL PROCESS OF CONTROLLED COOLING OF LOW-STIFFNESS RINGS AFTER RING ROLLING

Abstract

The advantages of ring rolling production and its problems are described: shape errors and stresses arising in low-stiffness rings during manufacturing. The technology of controlled cooling of rings under the action of cyclic loading - dynamic stabilisation - is proposed as a fundamentally new technological operation increasing the accuracy of manufacturing of low-stiffness rings and reducing residual stresses in them. The principal advantage of the method over other types of dressing is explained. Recommendations are given on operating modes, design and creation of an experimental unit for controlled cooling of test low-rigid rings in order to eliminate deformations and remove residual stresses arising during ring manufacturing at ring-rolling complexes. Their use will ensure the implementation of the technological process of controlled cooling of low-stiffness rings planned to be manufactured by the ring rolling method at the Belarusian Automobile Plant.

Keywords:

friction disc, relative width, stress state, warpage, deviation from flatness, magnetic properties, dynamic stabilization.

Для принятой схемы двухрычажного рычажно-шарнирного механизма двухстороннего действия радиальное усилие P и усилие Q на штоке приводного цилиндра связаны зависимостью

$$Q = \frac{Pn}{i},$$

где n – число плунжеров; i – передаточное отношение между штоком приводного цилиндра и плунжером.

Сообщается о методике и результатах силового расчета параметров нагружения для кольцевых заготовок 74052-3103036, 7405-2405050 и Венец Ø480 × 370 × 135. Показано, что максимальное усилие при нагружении кольца требуется в конце перемещения нагружающих плунжеров и при положении рычагов рычажно-шарнирного механизма (см. рис. 2) в конечном горизонтальном положении. Поэтому усилие приводного цилиндра и его диаметр выбираются при конечных углах γ наклона рычагов в пределах 2...6 град (в пределах 150 т). Силовые параметры на штоке приводного цилиндра рассчитаны при условном пределе текучести $\sigma_{0,2} = 74$ кг/мм², что соответствует параметрам для стали 40ХМФА в холодном состоянии.

Заключение. Для повышения точности изготовления маложестких колец и снижения остаточных напряжений в них предложена технология управляемого охлаждения колец под действием циклического нагружения – динамической стабилизации. Даны рекомендации по режимам работы, проектированию и созданию экспериментальной установки для управляемого охлаждения тестовых маложестких колец с целью устранения возникших при изготовлении колец на кольцераскатных комплексах деформаций и снятия остаточных напряжений. Их использование обеспечит реализацию технологического процесса управляемого охлаждения маложестких колец, планируемых к изготовлению методом кольцераскатки на Белорусском автомобильном заводе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 424 с.
2. Ковка и штамповка: справочник: в 2 т. Т. 2: Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 692 с.
3. **Groche, P.** Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstatttechnik. – 2005. – № 10. – P. 798–802.
4. **Doege, E.** Handbuch Umformtechnik / E. Doege, B.-A. Behrens. – Springer Verlag, 2007. – 913 p.
5. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 245 с.
6. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 2 (55). – С. 43–54.
7. **Антонюк, В. Е.** Разработка классификатора колец при использовании процесса кольцераскатки / В. Е. Антонюк, В. В. Яворский // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер.

- ЧЕМОДУРОВ А. Н., АБРАМОВ Е. А., ЕСИН С. Н. Исследования в области развития FGF-технологии для аддитивного производства..... 186
- ЧЕРНЯКОВ Ю. Д., ЖИГАЛОВ А. Н., КУБРАКОВ И. В. Технологические особенности депарафинизации в вакуумной печи за один цикл с процессом спекания..... 190
- ШИРОЧЕНКО В. А., НЕДЮХИН В. А., КОРОТКЕВИЧ Т. А. Компьютерная визуализация функционирования имитационной модели производственных процессов..... 194
- ШИШОВ С. П., СТАЦЕНКО А. А. Повышение производительности и безопасности труда при совместном взаимодействии коллаборативных роботов и человека..... 199
- ЯВОРСКИЙ В. В., АНТОНЮК В. Е., САНДОМИРСКИЙ С. Г. Технологический процесс управляемого охлаждения маложестких колец после кольцераскатки..... 204

CONTENTS

Plenary session

ZHIGALOV A. N., BASHARIMOV M. V., ZHARIKOV A. N., CHERNYAKOV YU. D., KUBRAKOV I. V. Innovative technology for obtaining carbide inserts of the BYTC brand.....	9
PETRESHIN D. I., POLSKIY E. A., PROKOFIEV A. A., SKACHKOV P. V. Technological support of reliability indicators of machine components at the stages of manufacturing, testing and breaking in.....	15
SHEMENKOV V. M., RABYKO M. A., YUMANOVA A. N. Technological aspects of using glow discharge to strengthen products from instrumental materials.....	19
ALIAKSEYEU YU. G., KOROLYOV A. YU., DAI WENQI. Influence of electrolyte-plasma treatment on the performance characteristics of the surface of ultrasonic medical waveguide.....	24
VOLCHEK O. M. Mathematical modeling of the force interaction of the rolls of the press and the pressed mixture.....	30
VYSOTSKAYA N. A. Features of the formation of mineral fertilizer granules in drum units.....	36
HRUSHA U. P., GUTEV A. P., BARANAU K. N. Directions of research in the field of casting cylindrical blanks from anti-friction silumins.....	40
ZHARIKAU A. N., JIGALOV A. N., BASHARIMOV M. V. Method of localization of leaks in vacuum systems.....	45
ZARETSKI U. A., GULKOW G. I. Modeling of the electric drive for mobile robot motion.....	50
ILYUSHINA E. V., YUSHKEVICH N. M. Research of strengthening pneumatic impact treatment of flat surfaces.....	56
KAPITONOV A. V., YURKEVICH B. S., BOCHKAREV S. S., KURBANNAZAROV A. S. Computer modeling of elastic deformations in the design of methods for processing parts with treadmills.....	62
KLYAUS O. N., ZHOLOBOV A. A. On the issue of choosing the optimal method of high-speed hole milling.....	68
KADNIANKA M. YU. Abrasive wear of alloy steels and alloy VK6.....	74
KOZHEVNIKOV M. M., GANAK O. B. Methods for automated design of layouts of robotic systems.....	80
KUDINOV E. A., VLADIMIROV A. A., MAKAROV A. V. Research of the influence of amplitude and frequency of vibration turning on wear of cutting tools.....	86
LOZIKOV I. A. Influence of methods of introducing modifying ligatures and base temperature on the structure and properties of bronzes.....	91

60 циклов с максимальным нагружением, создающих в материале кольца I напряжения величиной σ_m .

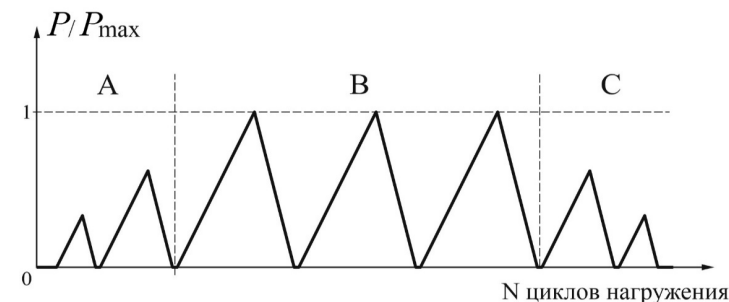


Рис. 4. Схема циклограммы динамической стабилизации маложестких колец по [11]

Циклограмма динамической стабилизации должна состоять из участков A , B и C (см. рис. 4). На участке A происходит рост нагрузки до начала возникновения в материале кольца I напряжений на уровне от 0,9 до 0,95 предела текучести от материала кольца при температуре стабилизации и возникновения петли механического гистерезиса. На участке B ширина петли механического гистерезиса материала кольца стабилизируется. На участке C петля механического гистерезиса материала кольца закрывается. На всех трех участках нагружение должно быть циклическим с достижением расчетного суммарного уровня нагружения.

Экспериментальная установка для стабилизации маложестких колец основана на нагружении кольца рычажно-шарнирным механизмом двухстороннего действия (см. рис. 2) по патенту [11] равномерно распределенными радиальными усилиями. В ней использована 6-позиционная схема нагружения равномерно распределенными радиальными усилиями (см. рис. 3, а).

В качестве объекта для проектирования установки приняты кольца 74052-3103036, 7405-2405050 и Венец Ø480 × 370 × 135 с параметрами, приведенными в табл. 1.

Табл. 1. Кольца малой жесткости для проектирования установки

Исходный параметр кольцевой заготовки	Обозначение	74052-3103036	7405-2405050	Венец Ø480 × 370 × 135
Марка стали		40ХМФА	40ХМФА	40ХН
Наружный диаметр, мм	D	392	462	480
Внутренний диаметр, мм	d	340	367	370
Высота кольца, мм	h	36	120	135
Профиль сечения		Прямоуг.	Прямоуг.	Прямоуг.
Средний радиус, мм	r	183	207,25	212,5
Ширина сечения, мм	s	26	47,5	55
Площадь сечения, мм ²	F	936	5700	7425
Масса заготовки, кг	m	8,5	58,3	77,9

внутреннему периметру изделия в противоположных от оси изделия I направлениях (рис. 2).

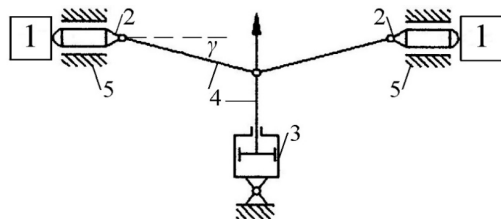


Рис. 2. Схема нагружения маложесткого кольца I плунжерами 2 в устройстве по [11]: 3 – гидропривод; 4 – рычажно-шарнирный механизм; 5 – корпус; γ – угол наклона рычага

При этом однополярная сила разжима P , благодаря кольцевой форме изделия I , создает в его материале растягивающие усилия противоположного направления (рис. 3). Приложение сил разжима P в противоположных от оси изделия I направлениях (см. рис. 3) обеспечивает устойчивое положение изделия I в процессе стабилизации его размеров. Силовое воздействие на изделие I , в соответствии с [11], обеспечивает создание в материале изделия I напряжений нужной величиной σ_m для всех сталей, изделия из которых подвергают стабилизации размеров.

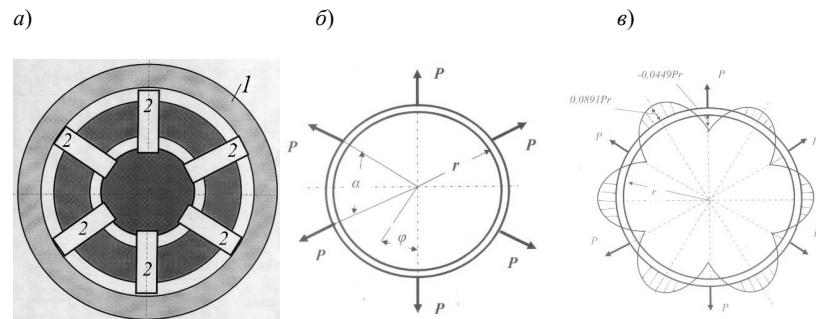


Рис. 3. Схемы нагружения кольцевой заготовки 6-ю равномерно распределенными радиальными усилиями: а – схема расположения стабилизируемого изделия I и плунжеров 2; б – схема нагружения кольца радиальными силами P ; в – эпюры изгибающего момента

Сущность управляемого охлаждения заключается в охлаждении кольцевых заготовок с одновременным действием на них циклического нагружения при постоянном геометрическом параметре заготовки [12]. Схема циклограммы нагружения, согласно которой должны меняться растягивающие напряжения в изделии I , представлена на рис. 4. Количество вращательных перемещений сил P разжима относительно внутренней поверхности кольца устанавливают из расчета воздействия на материал кольца I до 200 циклов нагружения при до

MIRONOVA M. N., TSARANOK V. V. Algorithms for controlling the movement of a mobile robot.....	96
MOGUCHEVA A. A., GRINEV D. V., DMITRIEV S. I., EVGENIEVA E. A. Advanced engineering school of hybrid technologies in machine building of the Union State.....	102
NIKIFOROVICH S. O., ANTONYUK V. E., SANDOMIRSKI S. G. Opportunities for the development of ring rolling production in Belarus.....	106
PASHKEVICH V. M., AFANEVICH V. V., TYURINA A. V. Influence of inertia-pulse treatment on the microhardness of the surface layer.....	112
POLSKIY E. A., CHVIRYAEV M. V., ABRAMOV R. V., SUKHOVEI V. V. Echnological ensuring durability of mod-generating prefabricated elements of press molds.....	118
POPOK N. N., ANISIMOV V. S., KORBA K. V. Dynamics of the cutting process with cutters with steeply inclined cutting edges.....	122
POPRUKAYLO A. V., KOSTYUKOVICH G. A., KIPNIS M. E., OVCHINNIKOV E. V., KALYNOV D. S. Optimization of technology for the formation of antifriction polymer coatings for parts of splined joints of cardan transmissions.....	129
PUMPUR V. A., DUVALAU P. Y., ANDRYIENKA V. M. Methodology of parametric identification of heat transfer while casting detail of centrifugal crushing and grinding equipment.....	136
RADKEVICH A. A. Microprocessor control of asynchronous traction electric cdrive of a robotic electric bus.....	142
RADKEVICH A. A., PAULIUKAVETS S. A. Simulation of a method for checking the electric bus traction drive by heating by the equivalent current method.....	148
SAVCHITS A.V., SHUMYACHER V. M. Evaluation of the properties of abrasive material and tool using a complex of automated devices.....	154
SVIREPA D. M. Influence of treatment by magnetic-dynamic rolling and glow discharge on the roughness of inner cylindrical surfaces.....	159
SOROKIN S. V., VASILYEVA D. E., IGNATOVA M. S. Development of an automated system for selection of lubricant and coolant products.....	163
TROINICH V. A., HRYDZIUSHKA D. V. Decrease loads p-shaped skob mechanical connections rubber-fabric tapes belt conveyors.....	167
TROINICH V. A., KADNIANKA M. YU. Determination of wind loads acting on ottyazhki towers drilling rig.....	171
FEDARENKO A. M. Structural optimization of rough turning multi-pass processing.....	175
FEDOSENKO A. S., LOVSHENKO F. G., OLIENTSEVICH A. S., ANDREYEU I. K. Prospects for the application of mechanically alloyed powders for the formation of parts in the form of shells and production of products using additive methods.....	180

CHEMODUROV A. N., ABRAMOV E. A., ESIN S. N. Research in the field of fgf technology development for additive manufacturing.....	186
CHERNYAKOV Y. D., ZHIGALOV A. N., KUBRAKOVA I. V. Technological features of dewaxing in a vacuum furnace in one cycle with the sintering process.....	190
SIROCHENKO V. A., NEDYUKHIN V. A., KOROTKEVICH T. A. Computer visualization of the functioning of a simulation model of production processes.....	194
SHISHOV S. P., STATSENKO A. A. Productivity increase and labour safety enhancement during the interaction of colloborative robots and human.....	199
YAVORSKI V. B., ANTONYUK V. E., SANDOMIRSKI S. G. Technological Process of controlled cooling of low-stiffness rings after ring rolling.....	204

охлаждении кольца происходят его температурная усадка и коробление. Технология охлаждения и правки кольца при поставке кольцераскатных комплексов не предусматривается и разрабатывается изготовителем для конкретных колец. В результате окончательная точность колец зависит от ряда факторов и может различаться при изготовлении одних и тех же колец для разных производств. Кроме того, при механической и термической обработках деталей возникают остаточные напряжения, изменяющие геометрические размеры и форму изделий при последующей эксплуатации. Эта проблема проявляется при изготовлении маложестких колец.



Рис. 1. Процесс кольцераскатки маложесткого кольца

Общее решение задачи стабилизации геометрических параметров и снижения остаточных напряжений в процессе изготовления таких деталей отсутствует, поиски технологических методов ее решения продолжаются.

Цель работы – разработка основных принципов новой технологической операции, повышающей точность изготовления маложестких колец и снижающей остаточные напряжения в них, – управляемого охлаждения колец после кольцераскатки под действием циклического нагружения при планируемом производстве на Белорусском автомобильном заводе.

Для стабилизации формы и обеспечения стабильности геометрических размеров таких изделий в процессе эксплуатации используют правку деформированием статической нагрузкой [8] при помощи экспандеров. Но такой способ неэффективен, т. к. при деформировании изделий статической нагрузкой остаточные напряжения не удаляются, и через некоторое время изделие приобретает прежнюю форму.

Динамическая стабилизация основана на том, что при нагружении изделия знакопеременной циклической нагрузкой с амплитудными значениями в диапазоне от предела пропорциональности до предела текучести происходит стабилизация геометрической формы изделия относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки [9, 10]. Процесс динамической стабилизации происходит в относительно узком диапазоне высоких напряжений, но не выше предела текучести σ_T , и в относительно узком диапазоне суммарного числа циклов нагружения с учетом свойств упрочняющихся и разупрочняющихся материалов. Для реализации динамической стабилизации необходимо создание напряженного состояния в возможно большем объеме детали.

По изобретению [11] циклическое силовое воздействие на изделие / кольцевой формы силой разжима P осуществляют в радиальном направлении по

УДК 621.81

В. В. ЯВОРСКИЙ¹**В. Е. АНТОНЮК²**, д-р техн. наук, проф.**С. Г. САНДОМИРСКИЙ²**, д-р техн. наук, доц.¹ ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (Жодино, Беларусь)² Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (Минск, Беларусь)**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС УПРАВЛЯЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ КОЛЕЦ ПОСЛЕ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ****Аннотация**

Описаны преимущества производства изделий кольцераскаткой и его проблемы: погрешности формы и напряжения, возникающие в маложестких кольцах при изготовлении. В качестве принципиально новой технологической операции, повышающей точность изготовления маложестких колец и снижающей остаточные напряжения в них, предложена технология управляемого охлаждения колец под действием циклического нагружения – динамической стабилизации. Объяснено принципиальное преимущество метода перед другими видами правки. Даны рекомендации по режимам работы, проектированию и созданию экспериментальной установки для управляемого охлаждения тестовых маложестких колец с целью устранения возникших при изготовлении колец на кольцераскатных комплексах деформаций и снятия остаточных напряжений. Их использование обеспечит реализацию технологического процесса управляемого охлаждения маложестких колец, планируемых к изготовлению методом кольцераскатки на Белорусском автомобильном заводе.

Ключевые слова:

кольцо, кольцераскатка, жесткость, остаточные напряжения, циклическое нагружение, динамическая стабилизация.

В основе кольцераскатки, которую широко используют в автомобилестроении, лежит пластическое деформирование материалов, основные положения которого применяют при разработке технологий кольцераскатки [1–4]. Кроме возможности изготовления деталей сложной формы, пластическое деформирование позволяет создавать ответственные детали машиностроения с высокими точностью и механическими свойствами. Исследования процесса кольцераскатки и применение современной компьютерной технологии позволили создать автоматизированные кольцераскатные комплексы [5]. Для отечественного машиностроения производство маложестких деталей кольцераскаткой является приоритетным и актуальным направлением [6]. Оно гарантирует высокие механические свойства ответственных изделий кольцевой формы (за счет отсутствия швов) и снижает их материалоемкость. По предложенной классификации маложесткими кольцами считают кольца с отношением внутреннего диаметра d к наружному диаметру D в пределах $d/D = 0,84...0,90$ и отношением высоты h кольца к D в пределах $h/D = 0,03...0,12$ [7].

Основной технологией изготовления маложестких колец является кольцераскатка в горячем состоянии (рис. 1), в процессе которой возникает специфическая погрешность в виде овальности изготовленных колец. При

УДК 621.9

А. Н. ЖИГАЛОВ, д-р техн. наук, доц.**М. В. БАШАРИМОВ****А. Н. ЖАРИКОВ****Ю. Д. ЧЕРНЯКОВ****И. В. КУБРАКОВ**

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН МАРКИ ВУТС**Аннотация**

Показано, что машиностроительная отрасль Республики Беларусь потребляет в год по импорту 2552010 шт. твердосплавных металлорежущих пластин на сумму более 20,0 млн долл. США. В ИТМ НАН Беларуси освоили инновационную технологию изготовления пластин марки ВУТС, показавшую высокое качество твердосплавных пластин ВУТС РНУА 110408, износ которых в 1,78 раза меньше, чем износ пластин РНУА 110408 одного из производителей.

Ключевые слова:

твердосплавные металлорежущие пластины, технология получения пластин марки ВУТС, плотность, масса, химический состав, твердость, пористость, размер зерен.

Твердосплавные металлорежущие пластины являются основным видом инструмента, применяемым в машиностроительном производстве.

Проведенные статистические исследования потребления твердосплавных металлорежущих пластин ведущими машиностроительными предприятиями Республики Беларусь (111 предприятий) показали, что твердосплавные пластины в нашей стране практически не производятся, а завозятся по импорту (рис. 1).



Рис. 1. Средний срез завозимой в Республику Беларусь твердосплавной продукции

Общее потребление 111 предприятиями Республики Беларусь твердосплавных пластин, изготовленных из сплавов ВК8, Т5К10 и Т15К6, составляет более 1,58 млн шт. в год (табл. 1). Кроме того, предприятия приобретают 966486 шт. твердосплавных пластин с разнообразными покрытиями.

Табл. 1. Количественная структура твердосплавного инструмента по видам и маркам сплавов

Сплав ВК				Сплав Т5К10				Сплав Т15К6			
Напайной	5 гр.	4 гр.	3 гр.	Напайной	5 гр.	4 гр.	3 гр.	Напайной	5 гр.	4 гр.	3 гр.
1152909	31080	17847	5943	69749	48941	7650	2292	136642	82528	14047	15896
Итого		1207779				128632				249113	
Всего										1583524	

Таким образом, машиностроительная отрасль страны потребляет в год по импорту 2552010 шт. твердосплавных металлорежущих пластин. В денежном выражении годовое потребление разнообразных по видам и сплавам твердосплавных пластин составляет более 20,0 млн долл. США.

Указанное количество твердосплавных пластин уже экономически целесообразно изготавливать на отдельном малотоннажном производстве. Такое производство создается на площадях ИТМ НАН Беларуси.

В институте была поставлена цель – производить качественную твердосплавную продукцию. Однако реализация указанной цели на первом этапе оказалась весьма сложным делом: в стране отсутствовали компетенции по производству твердосплавных режущих пластин и отечественное оборудование, учреждения образования не готовили специалистов по данному направлению. Кроме того, ведущие мировые производители твердосплавной продукции технологически далеко обошли нашу страну в таком роде производств, все научные разработки закрыты для общего обозрения.

Как показывает мировой опыт, создание такого рода производств осуществляется на технологиях, оборудовании и компетенциях ведущих производителей. У нас все это отсутствовало из-за санкционных ограничений.

В ИТМ НАН Беларуси была создана отраслевая лаборатория металлургии сплавов, набрана группа из девяти выпускников различных университетов (Гомельского университета им. П. О. Сухого, Белорусско-Российского университета, Барановичского государственного университета). Создан на базе ИТМ НАН Беларуси филиал кафедры технологии машиностроения УО «БарГУ», где велась дополнительная подготовка инженеров и магистров до требуемого уровня. Вся технологическая цепочка производства твердых сплавов была разбита на отдельные операции, за которыми закреплены конкретные специалисты. Каждому из них поставлены амбициозные задачи – создать и реализовать по своей операции обязательно инновационную технологию.

Отдельные этапы такой инновационной технологии производства твердосплавных пластин, созданной на базе ИТМ НАН Беларуси, представлены на рис. 2.

Перспективы дальнейшего развития этой концепции заключаются в возможности ограниченного использования промышленных роботов в роли коллаборативных. Это означает, что существующие промышленные роботы могут быть адаптированы и запрограммированы для совместной работы с людьми, что приводит к более гибким и эффективным во временных рамках рабочим процессам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Overview of Human-Robot Collaboration in Manufacturing Cobots [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/341416725>. – Date of access: 12.08.2023.
2. A Human-Robot Dynamic Fusion Safety Algorithm for Collaborative Operations of Cobots [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/357561623>. – Date of access: 18.08.2023.
3. Gesture recognition for human-robot collaboration: A review [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/314292635>. – Date of access: 24.08.2023.
4. Human Motion Prediction for Human Robot Collaboration A review [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/314292635>. – Date of access: 28.08.2023.

Контакты:

Standbruh@yandex.by (Шишов Станислав Павлович);
andrei.statsenko@gmail.com (Стаценко Андрей Анатольевич).

S. P. SHISHOV, A. A. STATSSENKO

PRODUCTIVITY INCREASE AND LABOUR SAFETY ENHANCEMENT DURING THE INTERACTION OF COLLOBORATIVE ROBOTS AND HUMAN

Abstract

The objective of the paper is to provide an insight into the scope of the research done in the field of the enhancement of a human and a collaborative robot interaction model, and also to introduce a new concept to provide safety and increased productivity during the interaction mentioned above. The principles of the system operations and the algorithm of the process have been given.

The potential advancements in the area have been outlined.

Keywords:

collaborative robots, cobots, trajectory, navigation and planning, recognition, labour safety, labour productivity.

может перестраиваться так, чтобы избежать столкновения. Для этого, например, может изменяться тип траектории на данном участке с криволинейного на прямолинейный, если это принесет необходимый результат. В случае, когда оперативно перестроить траекторию не представляется возможным, возможна индикация потенциального столкновения в виде звукового сигнала и других средств оповещения человека. Если же это оказывается безрезультатным, робот останавливается и ждет, пока человек не покинет ту часть рабочей зоны, по которой проложена траектория, после чего возобновит свою работу без дополнительного вмешательства в систему управления. Блок-схема данного алгоритма представлена на рис. 3. Осуществление концепта, основанного на предложенной схеме, позволит выработать принципы безопасной совместной работы коллаборативного робота и человека в одной рабочей среде.

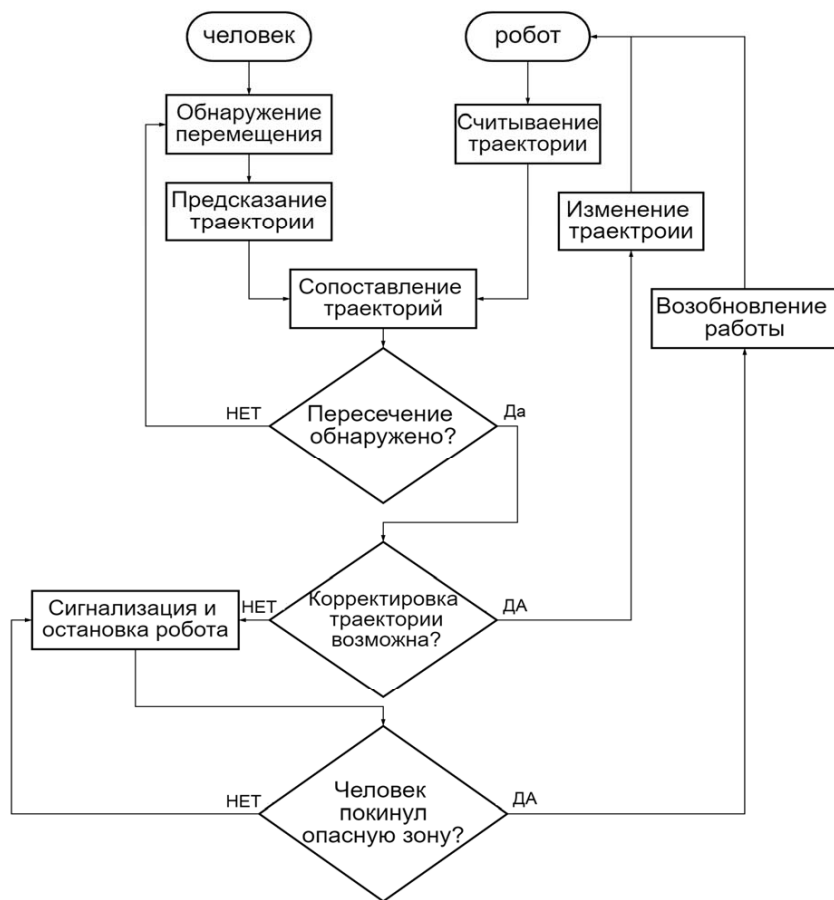


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы системы



Рис. 2. Отдельные этапы инновационной технологии производства твердосплавных пластин, созданной на базе ИТМ НАН Беларуси: а – прессование; б – спекание; в – упрочнение; г – контроль качества

Технология прессования основана на использовании высокопроизводительного трехрежимного пресса (см. рис. 2, а). Спекание осуществляется в одновременном цикле: депарафинизация – спекание (см. рис. 2, б). Упрочнение осуществляется аэродинамическим звуковым резонансным воздействием [1]. Контроль качества производится в исследовательской лаборатории ИТМ НАН Беларуси по шести методикам.

Для твердосплавной продукции, освоенной в ИТМ НАН Беларуси, было выбрано название ВУТС. Такое название ассоциируется со страной производителя и используемой при производстве технологии упрочнения.

Уровень качества пластин марки ВУТС рассмотрим на примере пластины РНУА 110408.

Для изготовления пластин использовался порошок, распыляемый из цементированного карбида (марка) YT5 (TiC – 5 %), производства Китай. Его характеристики: плотность – 12,9...13,05 г/см³; средний размер зерна WC – 1,2...2,0 мкм; кобальт – 9 %...9,5 %; титан – 5 %...5,5 %; парафин – 2 %...2,2 %.

Изготовленные твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408 были проверены в лаборатории института по шести методикам определения: плотности и массы, химического состава, твердости, геометрических размеров, пористости, размера зерен.

Результаты исследований показали, что точность пластин BYTC PNUA 110408 соответствовала ГОСТ 19064–80, твердость находилась в пределах 87,95...88,65 HRC, плотность – 13,01...13,60 г/см³, шероховатость – $Ra = 0,278...0,423$. Указанные параметры полностью соответствовали или ГОСТу, или заявленным требованиям.

Исследования пористости, размера зерна и поверхностного углерода осуществлялись на образцах, обработанных на шлифовальной станции LaboPol-100, при помощи микроскопа Leica DMi8 (рис. 3, табл. 2).

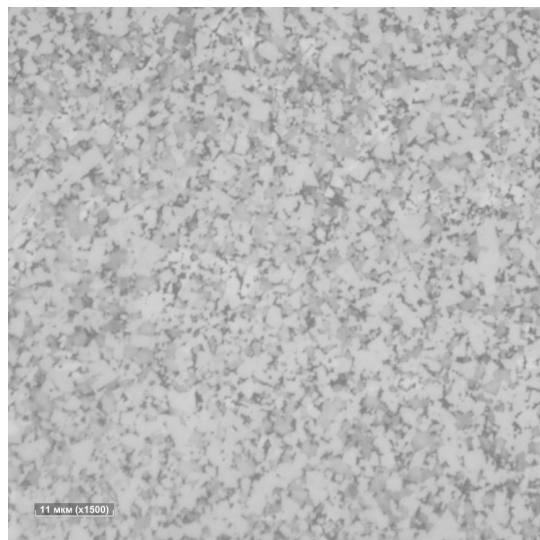


Рис. 3. Структура пластин BYTC PNUA 110408

Анализ данных табл. 2 показывает, что пористость пластин, находящаяся в пределах 0,01 %...0,10 %, соответствует ГОСТ 4872–75, согласно которому для сплава T5K10 объемное содержание пор должно быть не более 0,2 %. Средний размер зерен карбида вольфрама в пластинах BYTC PNUA 110408 – 1,2...1,5 мкм, что соответствует заявленным требованиям производителя порошка (1,2...2,0 мкм).

существующим в модели закономерностям, такая система может перестать выполнять возложенные на нее функции.

Поэтому предлагается разработать систему, которая бы анализировала рабочую область не только на предмет выполняемых в ней операций, но и такую, которая могла бы оценивать расстояние между объектами в рабочей зоне, а также предсказывать перемещение человека в ней на основе информации, получаемой в данный момент времени, и перестраивать траекторию движения робота так, чтобы предотвратить ее пересечение с траекторией движения человека без привязки к какому-либо предопределенному набору движений. Таким образом, планируется достичь большей безопасности человека при взаимодействии его с роботом, а также повысить производительность труда, т. к. вместо необходимости перезапуска системы, в случае возникновения столкновений в рабочей области, таковых удастся избежать, что может существенно сэкономить время в условиях производства.

Для практической реализации и проверки данного концепта с применением подходов, описанных в [2–4], был выбран коллаборативный робот TM5-700, установленный в лаборатории технологического оборудования кафедры «Технология машиностроения» Белорусско-Российского университета, рабочее пространство которого для 5 и 6 степеней свободы, обозначенных как 5DOF и 6DOF соответственно, представлено на рис. 2.

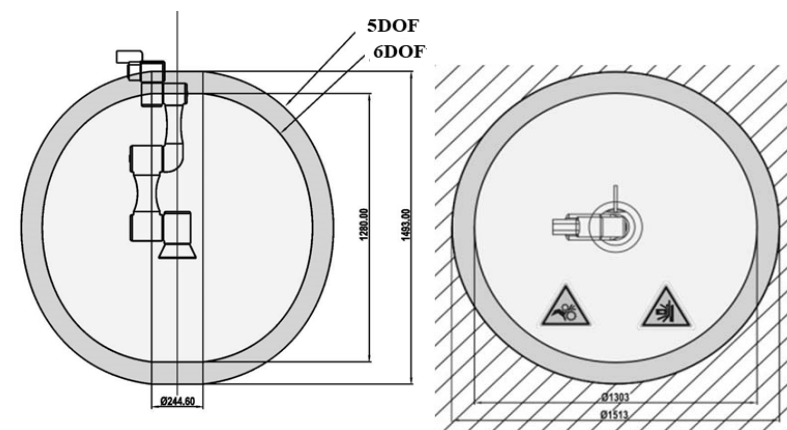


Рис. 2. Рабочая область коллаборативного робота TM5-700

В рамках концепта информацию о местоположении и траектории робота предполагается получать из системы управления и планирования траектории робота. Движение человека предсказывается на основе расчета траектории движения ключевых точек его виртуальной модели, полученной при помощи камер и датчиков глубины, и по специальным алгоритмам переносится на перемещение всего тела. В случае обнаружения потенциального пересечения траекторий человека и робота, в зависимости от того, каково расчетное время данного события, если оно еще относительно велико, траектория движения робота

сужает область ее применения, подход к построению динамических моделей человека и робота может быть применен гораздо шире – не только в вопросе безопасного взаимодействия, но и для реализации задачи избегания столкновений. Пример такой модели представлен на рис. 1.

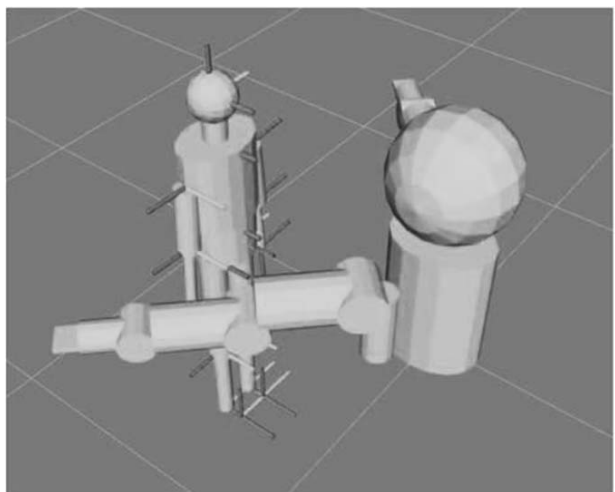


Рис. 1. Кибернетическая динамическая модель системы «человек – робот»

В [3] рассматриваются вопросы распознавания коллаборативными роботами жестов человека, а также оборудования, которое при этом возможно применять, – от камер до специализированных перчаток, позволяющих роботу напрямую получать информацию о передаваемом жесте. Однако в условиях промышленного производства возникает необходимость не столько в передаче информации роботу путем жестов, сколько в анализе движений человека в рабочей зоне с целью недопущения нанесения ему вреда со стороны робота, а также возможного изменения траектории движения робота таким образом, чтобы наилучшим образом обеспечить поддержку человеку в выполнении совместных задач.

Примером исследования в этой области является [4], где рассматривается подход, позволяющий предсказывать движения человека при их совместной работе в производственной среде. Для решения задачи предлагается использование различных статистических моделей, а также представлен пример работы такой системы на основе скрытой марковской модели.

Тем не менее недостатком данного подхода является необходимость четкого задания движений, выполняемых человеком в рабочем пространстве, среди которых и будет происходить распознавание. В случае же, когда человек будет отклоняться от заданных движений или выполнять их в разрез

Табл. 2. Значения пористости и размеры зерен пластин BYTC PNUA 110408

Образец	Номер снимка	Площадь пор, мкм ²	Пористость, %	Среднее значение пористости, %	Размер зерна, мкм	Средний размер зерна, мкм
1	1	116	0,036643922	0,035064	1,22	1,388
	2	42	0,013267627		1,5	
	3	50	0,015794794		1,45	
	4	34	0,01074046		1,42	
	5	313	0,098875411		1,35	
2	1	140	0,044225423	0,03159	1,45	1,384
	2	110	0,034748547		1,28	
	3	108	0,034116755		1,57	
	4	62	0,019585545		1,37	
	5	80	0,02527167		1,25	
3	1	158	0,049911549	0,05187	1,48	1,338
	2	182	0,05749305		1,37	
	3	130	0,041066464		1,25	
	4	206	0,065074551		1,27	
	5	145	0,045804903		1,32	

В структуре пластин BYTC PNUA 110408 отсутствовал свободный углерод, не зафиксировано наличие агломератов, которые могут образовываться при спекании, что указывает на правильный подбор режимов прессования и спекания.

Таким образом, проведенные исследования в лаборатории института показали высокое качество твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408.

Лабораторные исследования на износ пластин BYTC PNUA 110408 проводились на станке фрезерно-вертикальном 6Р82Ш при обработке материала – отливка из чугуна ВЧ50 (ГОСТ 26358–84). Химический состав СЧ50: С – 2,7 %...3,7 %, Si – 2,7 %...3,7 %, Mn – 0,3 %...0,7 %, S – до 0,02 %, P – до 0,1 %, Cr – до 0,15 %. Механические свойства: $HV_{10}^{-1} = 153...245$ МПа, $\sigma_B = 500$ МПа, $\sigma_m = 320$ МПа. Режимы: $v = 79$ м/мин, $s_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 1,5$ мм.

Износ пластин BYTC PNUA 110408 сравнивался с износом пластин PNUA 110408 без покрытия и с покрытием одного известного производителя, присутствующего на рынке Республики Беларусь.

Результаты зависимостей износа по задней поверхности режущего лезвия от времени резания пластин BYTC PNUA 110408, PNUA 110408 без покрытия, PNUA 110408 с покрытием при обработке чугуна ВЧ50 (рис. 4) показывают, что износ пластин BYTC PNUA 110408 при 98 мин резания в 1,78 раза меньше, чем износ пластин PNUA 110408 без покрытия, и в 1,58 раза больше, чем износ пластин PNUA 110408 с покрытием.

Таким образом, разработанная в ИТМ НАН Беларуси инновационная технология получения твердосплавных пластин марки BYTC позволяет получать металлорежущие твердосплавные пластины высокого качества.

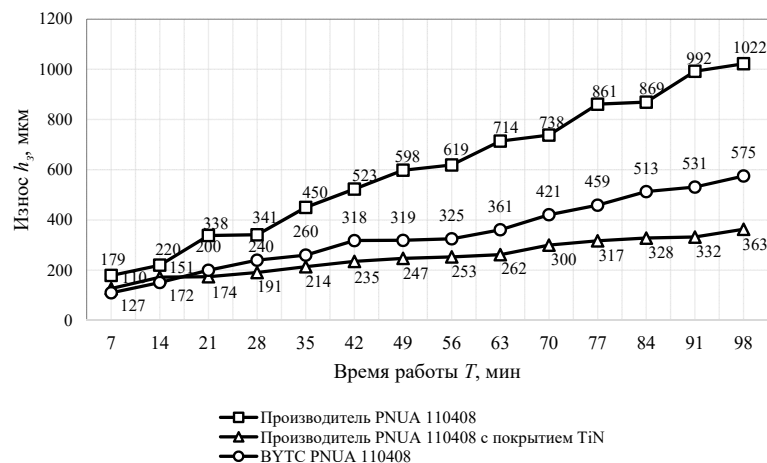


Рис. 4. Зависимости износа от времени резания пластин BYTC PNUA 110408, PNUA 110408 без покрытия, PNUA 110408 с покрытием при обработке чугуна ВЧ50

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.

Контакты:

Jigalov6@mail.ru (Жигалов Анатолий Николаевич);
 basharimovfilm@gmail.com (Башаримов Максим Владимирович);
 Artyom_Zhan@mail.ru (Жариков Артем Николаевич);
 yuchi.osn@gmail.com (Черняков Юрий Дмитриевич);
 riv20000@gmail.com (Кубраков Илья Владимирович).

**A. N. ZHIGALOV, M. V. BASHARIMOV, A. N. ZHARIKOV,
 YU. D. CHERNYAKOV, I. V. KUBRAKOV**

INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR OBTAINING CARBIDE INSERTS OF THE BYTC BRAND

Abstract

The machine-building industry of the Republic of Belarus consumes 2552010 pieces of import per year. carbide metal-cutting inserts in the amount of more than 20,0 million US dollars. ITM NAS of Belarus has mastered the innovative technology for manufacturing plates of the BYTC brand. The conducted studies showed the high quality of BYTC PNUA 110408 carbide inserts, the wear of which is 1,78 times less than the wear of PNUA 110408 inserts from one of the manufacturers.

Keywords:

carbide metal-cutting inserts, BYTC insert technology, density, mass, chemical composition, hardness, porosity, grain size.

УДК 621.865.8

С. П. ШИШОВ

А. А. СТАЦЕНКО, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА ПРИ СОВМЕСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ И ЧЕЛОВЕКА

Аннотация

Рассмотрены существующие исследования, проводимые в области увеличения эффективности взаимодействия человека с коллаборативными роботами, а также предложена новая модель системы обеспечения безопасности и повышения производительности труда при работе людей с роботами. Изложен принцип работы данной системы, составлена блок-схема алгоритма ее функционирования. Описаны перспективы работы в данном направлении.

Ключевые слова:

коллаборативные роботы, кобот, траектория движения, навигация и предсказание, распознавание, повышение безопасности, повышение производительности.

Все более частое применение коллаборативных роботов – таких, которые предназначены для совместной работы с человеком в одном рабочем пространстве, обусловлено возможностью повышения эффективности производства, улучшения качества изделий, снижения травматизма и создания более гибкой производственной среды.

В [1] рассматриваются примеры такого взаимодействия в автомобилестроении, электронике, металлообработке и других областях производства. Вместе с тем подчеркиваются и препятствия, возникающие в процессе внедрения такого сотрудничества: вопросы безопасности и защиты жизни и здоровья человека, необходимость разработки специфического программного обеспечения и рабочих алгоритмов, а также адаптации рабочей среды для взаимодействия человека и робота.

Существующие в настоящий момент системы безопасности коллаборативных роботов, или же коботов, требования к которым закреплены в различных нормативных документах, таких как, например, ISO/TS 15066:2016, предполагают либо методы ручного управления и остановки робота при возникновении внештатной ситуации, либо прекращение его работы за счет контроля скорости, мощности и создаваемого усилия, когда при превышении определенных показателей робот останавливается.

Тем временем существуют и другие методы улучшения качества безопасности и производительности взаимодействия «человек – машина» на основе визуального распознавания образов с применением, например, камер технического зрения и датчиков расстояния.

Способ совершенствования алгоритмов безопасности, предусмотренных вышеописанными стандартами, связанными с физическим взаимодействием робота и человека, предлагается в [2]. И хотя данная работа предполагает необходимость контактного взаимодействия человека и робота, что несколько

действия продолжают в течение всего периода моделирования и обеспечивают реализацию заданного закона управления межцеховым транспортом.

Визуализация моделируемого процесса позволяет более детально разобраться в особенностях его функционирования, выявить проблемы, снижающие эффективность производства, и оптимизировать его параметры. На основе вычислительного эксперимента с построенной таким образом имитационной моделью осуществляется обоснование параметров оптимального закона управления межцеховым транспортом, которые реализуются в соответствующей автоматизированной системе, обеспечивающей повышение эффективности рассматриваемого производственного подразделения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жихарев, А. Г. Системно-объектный подход в контексте агентного моделирования / А. Г. Жихарев, Р. А. Маматов // Научный результат. Информационные технологии. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 25–31.

2. Широченко, В. А. Об особенностях моделирования производственных процессов / В. А. Широченко, Т. В. Пузанова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 247–248.

Контакты:

shirsvet@tut.by (Широченко Виктор Александрович);

firevadick@gmail.com (Недяхин Вадим Александрович);

tymoteyszk@gmail.com (Короткевич Тимофей Александрович).

V. A. SIROCHENKO, V. A. NEDYUKHIN, T. A. KOROTKEVICH

COMPUTER VISUALIZATION OF THE FUNCTIONING OF A SIMULATION MODEL OF PRODUCTION PROCESSES

Abstract

The work examines the issues of creating and animation of production processes, in which a significant role is played by the processes of transporting products between various technological operations performed on special machine equipment. Particular attention is paid to modeling and testing the laws of control of intra-shop transport, which can be used to build a special automated system that allows increasing the efficiency of the production system.

Keywords:

simulation modeling, production processes, animation, intra-shop transportation, transport management.

УДК 621.9.016

Д. И. ПЕТРЕШИН¹, д-р техн. наук, проф.

Е. А. ПОЛЬСКИЙ¹, канд. техн. наук, доц.

А. А. ПРОКОФЬЕВ², канд. техн. наук

П. В. СКАЧКОВ¹

¹Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

²Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО» (Москва, Россия)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ МАШИН НА ЭТАПАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ИСПЫТАНИЯ И ПРИРАБОТКИ

Аннотация

Рассмотрены вопросы технологического обеспечения показателей надежности узлов деталей машин с учетом влияния отдельных технологических пределов.

Ключевые слова:

качество поверхности, износостойкость, эксплуатационные свойства, технологический предел, надежность изделия.

В ответственных изделиях машиностроения можно выделить сборочные единицы, которые на этапах изготовления проходят несколько производственных этапов – механическая обработка с формированием параметров точности и качества поверхности, промежуточная сборка для выполнения обкатки и приработки, разборка и промежуточный контроль функциональных поверхностей на отсутствие визуальных дефектов и пятна контакта. Кроме этого, для узлов с высокими требованиями по точности замыкающего звена на отдельных операциях контролируют плавность хода и шумность подузла.

Одним из инструментов анализа и повышения эффективности производства является концепция бережливого производства, под которым понимают логистическую концепцию менеджмента, сфокусированную на оптимизации бизнес-процессов.

Внедрение этапов и направлений бережливого производства направлено на постоянное совершенствование производства и сокращение элементарных затрат с обеспечением стабильного качества изделия, под которым в области технологии машиностроения понимают достижение показателей надежности узла и машины в целом.

Базовым показателем производительности является время, затрачиваемое на выполнение технологического процесса. Необходимо разделить его отдельные части на рабочие приемы или просто приемы. Прием – это полный набор действий, направленных на выполнение перехода или его части и объединенных одной целью.

Узел чашки дифференциала является одним из основных в общей структуре трансмиссии колесной тележки. При этом основной процент брака и причина выхода из строя узла – это формирование завышенного зазора в соединении

шестерни и корпуса. С конструкторской точки зрения задача обеспечения показателей надежности решалась введением в конструкцию промежуточного звена в виде шайбы.

Под технологическим переделом понимают законченную часть технологического процесса, характеризующую формированием законченного этапа изготовления изделия или узла.

При изготовлении узла чашки дифференциала выделяют несколько взаимосвязанных технологических переделов: изготовление деталей сборочного подузла, сборка подузла с формированием точности замыкающего звена сборочной размерной цепи с учетом установленных технологических ограничений, обкатка узла и подбор сопрягаемых деталей по установленным критериям (вибронгруженность, шумность и др.), сборка узла чашки дифференциала с обеспечением установленных показателей надежности.

На каждом технологическом переделе (этапе) проводят контроль и отбраковку сопрягаемых деталей, что значительно увеличивает общее время изготовления узла и изделия в целом, при этом создается часто неустраиваемый запас деталей, не прошедших контроль.

В настоящее время разработаны модели и определены направления технологического обеспечения эксплуатационных свойств отдельных функциональных поверхностей сопрягаемых деталей, но при этом недостаточно проработаны вопросы комплексного конструкторско-технологического обеспечения общей совокупности эксплуатационных свойств деталей сборки с учетом этапов промежуточной сборки и предварительной обкатки.

Таким образом, задача обеспечения показателей надежности узла на этапах конструкторско-технологической подготовки производства с проектированием технологии изготовления и сборки на основе анализа выбора материала и параметров качества поверхностей сопрягаемых деталей с учетом этапов промежуточной сборки подузла и его обкатки с оптимизацией по критерию снижения технологического передела является достаточно актуальной.

Работы, необходимые для выполнения сборки изделия, определяются на основе анализа чертежей узлов деталей, а также конкретных условий, в которых выполняется сборка. К ним относятся:

- состояние, в котором детали и узлы подаются на сборку;
- принятые технологические методы выполнения соединений;
- необходимые методы проверки установленных соединений и т. д.

В зависимости от цели использования работы, выполняемые при сборке, можно разделить на следующие группы [1].

1. Механическая обработка, выполняемая в сборочном цехе по разным причинам: совместная обработка нескольких деталей; притирка и чистовая обработка плоских, цилиндрических и конических поверхностей и т. д.

2. Выполнение соединений деталей и узлов. В эту группу входят работы по внедрению разъемных и несъемных, подвижных и фиксированных соединений, которые выполняются всеми технологическими методами.

3. Работы, осуществляемые для пригонки и регулировки. К ним относятся: измерение размера замыкающего звена; частичная разборка узла, состоящая в

Исходный граф содержит все возможные вершины и дуги, участвующие в межоперационных перевозках изделий. При наличии свободного транспорта и появлении сигнала о готовности к перевозке одной или нескольких сформированных транспортных партий из исходного графа создается текущий граф. В него будут включены все точки погрузки, в которых сформированы транспортные партии, и соответствующие им точки разгрузки перевозимых изделий. Включение или исключение какой-либо вершины из графа сопровождается подключением или отключением соответствующих дуг сетевого графа. На сформированном таким образом текущем графе решается задача линейного программирования для отыскания кратчайшего маршрута последовательного обхода всех вершин графа без петель и циклов от его истока к стоку и определяется длина этого маршрута. Если свободных транспортов несколько, то формирование маршрута осуществляется для каждого из них по отдельности на своем текущем графе, а затем выбирается транспорт и его маршрут, для которого решение задачи оказалось наилучшим.

В том случае если в транспортном обслуживании межоперационных перевозок участвует несколько различных типов транспорта, каждый из которых может быть задействован только в закрепленных за ним технологических цепочках, то оценка возможных маршрутов осуществляется только для тех видов транспорта, которые предназначены решить задачу перевозки для всех подготовленных к этому изделий. Для этого перед решением задачи отыскания кратчайшего пути для очередного свободного транспорта необходимо сверить вектор сигналов о готовности транспортных партий к перевозке (вектор s) с вектором возможности перевозки соответствующих транспортных партий (вектор v) данным транспортом. Проверка осуществляется путем сравнения суммы произведения векторов s и v с суммой элементов вектора s .

Если сверяемые значения совпадают, то транспорт может участвовать в решении задачи в данной транспортировке, а если нет, то для него маршрут не формируется. Однако если этот транспорт является единственным свободным, то, очевидно, он должен участвовать в транспортировке возможного для него груза.

После получения кратчайшего маршрута перевозки подготовленных транспортных партий изделий к месту дальнейшей их обработки или сборки необходимо сформировать последовательность действий (операций), которые должны быть выполнены, чтобы такая перевозка была осуществлена. Для этого используется копия матрицы смежности графа транспортных маршрутов, значениями которой являются номера соответствующих операций и вектор номеров операций погрузки и разгрузки. Перебирая ячейки этой матрицы в том же порядке, в котором расположены отрезки сформированного маршрута перевозок и соответствующие элементы вектора операций погрузки и разгрузки, будет получена искомая последовательность операций. Сформированная последовательность будет управлять последовательностью комплексных операций на одном цикле перевозок. После завершения такого цикла формируются новый оптимальный маршрут для следующей подготовленной транспортной партии и последовательность операций для его обеспечения. Эти

Транспортное оборудование, в отличие от станочного, участвует в нескольких операциях, таких как переезд к месту погрузки, погрузка, перевозка, разгрузка и, возможно, других. Каждая из этих операций имеет свою длительность и связь со своими заделами. Так, например, переезд с места стоянки к месту погрузки уменьшает количество транспорта на стоянке и по окончании переезда позволяет начать погрузку. В свою очередь погрузка уменьшает количество изделий на соответствующем заделе и переносит их на погрузочное место транспорта. И так далее.

На рис. 1 показана модель производства сварной конструкции, состоящей из двух деталей, одна из которых обрабатывается на токарной операции, а вторая – на фрезерной. Предусматривается, что на сборку-сварку детали перевозятся транспортом, который вначале находится на стоянке, а затем после сигнала о готовности перевозки первой детали переезжает на место под погрузку (операция 1), осуществляется погрузка (операция 2), перевозка детали на место разгрузки (операция 3) и разгрузка (операция 4).

При описании транспортных потоков необходимо иметь в виду, что перед началом рабочей смены весь транспорт находится на основной стоянке, на которой осуществлялись его обслуживание между рабочими сменами и подготовка к работе. Эту стоянку назовем исходной. В своей работе транспорт должен осуществлять перевозки деталей, прошедших через некоторую технологическую операцию на одном оборудовании и собранных в количестве, заданном величиной транспортной партии, к другому оборудованию для выполнения следующих операций, предусмотренных технологическим маршрутом производства деталей или получения из отдельных деталей сборочной единицы. В процессе таких перевозок транспорт подъезжает к месту, откуда должна быть перевозка, осуществляется погрузка перевозимых изделий, их перевозка к месту назначения и разгрузка изделий в месте назначения. В некоторых случаях транспорт может перевозить в одном рейсе несколько различных транспортных партий изделий, обслуживая при этом несколько технологических цепочек производства деталей. Освободившийся после разгрузки транспорт не возвращается в место исходной стоянки, а останавливается на специально предназначенной для этого промежуточной стоянке, где ожидает вызова на выполнение следующего рейса.

Описание в модели транспортных маршрутов, по которым должно осуществляться транспортное обслуживание межоперационных перевозок, представляет собой сетевой нагруженный ориентированный граф с истоком и стоком. Вершинами этого графа являются точки погрузки и разгрузки перевозимых изделий. Исходной вершиной является точка стоянки транспорта в начале смены или точка, в которой был завершен предыдущий рейс. Конечной вершиной является условная вершина, завершающая выполненный транспортный цикл и расположенная после точки разгрузки транспорта. Дугами сетевого графа являются возможные маршруты движения транспорта по проездам цеха. Назовем этот сетевой граф графом транспортных маршрутов.

Математически граф описывается матрицей смежности вершин, элементы которой представляют собой расстояния между соответствующими вершинами.

ослаблении и отсоединении деталей до снятия компенсирующего звена; установка фиксированного компенсатора путем шлифования, токарной обработки или другими технологическими методами.

4. Проверка правильности соединений деталей и узлов в процессе сборки. К ним относятся: свободное вращение, радиальный и осевой люфт, боковой зазор и пятно контакта зубьев установленных шестерен и т. д. Эти работы определяются на основе технических требований к изделиям.

Для обоснованного назначения допусков, верхних и нижних отклонений размеров размерных цепей, обеспечивающих точность замыкающего звена, рекомендуется применять метод оптимизации по показателям надежности узла (в данном случае долговечности) [2]:

$$\left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^\mu + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\varepsilon_k})^\mu} \right)^2} \leq T_\Delta, \right. \\ \left. 1 - P(t) \leq [Q] \right\}$$

где $[Q]$ – величина допустимого брака.

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left(\frac{T_\Delta - T_0 - \gamma_{cp} t}{\sqrt{\sigma_{T_0}^2 + \sigma_\gamma^2(t) t^2}} \right),$$

где t – срок службы машины, в течение которого необходимо обеспечить вероятность безотказной работы $P(t)$; $\Phi(x)$ – стандартное нормальное распределение функции; T_0 – допуск замыкающего звена после изготовления и сборки машины, равный допуску составляющих размеров на этот момент времени; γ – скорость изменения размера замыкающего звена во времени; σ – среднеквадратические отклонения соответствующих параметров.

В качестве основных положений и методик расчета поверхностей на трение и износ при скольжении приняты зависимости, изложенные в работах А. Г. Суслова. Преобразовав зависимости с учетом требований по возможности метрологического контроля, технологического управления и приоритетности параметров качества, влияющих на износостойкость, получаем [3]

$$C_R = \frac{(Wz \cdot H \max)^{1/6}}{Sm^{0,5} \cdot \lambda \cdot (k \cdot \sigma_T)^{2/3}} \cdot Ra^{2/3} \cdot (Rp - Ra)^{0,5};$$

$$C_M = \frac{n}{43,47 \cdot (p \cdot \pi)^{7/6}} \cdot \sqrt{\frac{E}{1 - \mu^2}}.$$

Определение значений коэффициентов внешних $k_{внеш_j}$ и внутренних $k_{внут_j}$

факторов эксплуатационных звеньев-износов для заданного прототипа и с учетом требований по долговечности позволит обосновать выбор материалов, смазки, параметров качества поверхности.

Вместе с коэффициентами передаточных отношений выделенные из эксплуатационного допуска $k_{внеш_j}$ и $k_{внут_j}$ используем для решения задачи моделирования влияния технологических факторов и воздействия различных эксплуатационных звеньев на точность замыкающего звена. Можно на этапе выбора конструкционного материала скорректировать возможность управления механическими свойствами, а при выполнении этапов технологической подготовки производства назначать переходы по обеспечению параметров качества поверхности.

Для решения задачи технологического обеспечения наработки узла на отказ, с учетом элементарных затрат на технологических переделах, предполагается формирование математической модели, включающей этап приработки, корректировку допусков и предельных отклонений функциональных сопрягаемых размеров деталей сборки и рекомендации по включению в технологический процесс финишных переходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога / Под общ. ред. А. Г. Суслова. – Москва: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
2. **Польский, Е. А.** Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей / Е. А. Польский, С. В. Сорокин // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 6 (132). – С. 38–48.
3. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А. Г. Суслов [и др.]. – Москва: Инновационное машиностроение, 2022. – 552 с.

Контакты:

dipetreshin@yandex.ru (Петрешин Дмитрий Иванович);
 polski.eugene@hotmail.com (Польский Евгений Александрович);
 ran87066@mail.ru (Прокофьев Алексей Александрович);
 pavel9798@mail.ru (Скачков Павел Владиславович).

D. I. PETRESHIN, E. A. POLSKIY, A. A. PROKOFIEV, P. V. SKACHKOV

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF RELIABILITY INDICATORS OF MACHINE COMPONENTS AT THE STAGES OF MANUFACTURING, TESTING AND BREAKING IN

Abstract

The issues of technological support for reliability indicators of machine parts assemblies are considered, taking into account the influence of individual technological stages.

Keywords:

surface quality, wear resistance, performance properties, technological processing, product reliability.

моделируются различные управленческие воздействия в производственной системе.

Для построения модели на экране выделено прямоугольное пространство, представляющее собой производственный цех или участок. На этом участке прямыми линиями изображаются границы, указываются въезды и выезды с него, а также транспортные проезды для перемещения деталей по цеху. Построение модели осуществляется на основе общего вида цеха или участка, на котором показаны места расположения станков, складирования заготовок и готовых деталей (межоперационные заделы), рабочие места (полузакрашенные кружки), проезды для транспорта и необходимые размеры, добавляя необходимую информацию для формализации производственного процесса.

Для построения технологической цепочки производства разработчик имитационной модели перетаскивает с помощью компьютерной мышки соответствующий элемент с палитры и устанавливает его в место, соответствующее ему по планировке цеха. Пример такой построенной модели представлен на рис. 1. Графические объекты, отображающие технологические операции, снабжены соединительными элементами, предназначенными для построения связи с другими объектами. Для простоты построения графический объект снабжен одним входом и одним выходом, к которым может быть подсоединено любое количество других объектов. Для демонстрации объектом выполнения технологической операции его графическое изображение дополнено прямоугольным элементом, который во время анимации производственного процесса постепенно заполняется заданным цветом и показывает степень завершения операции.

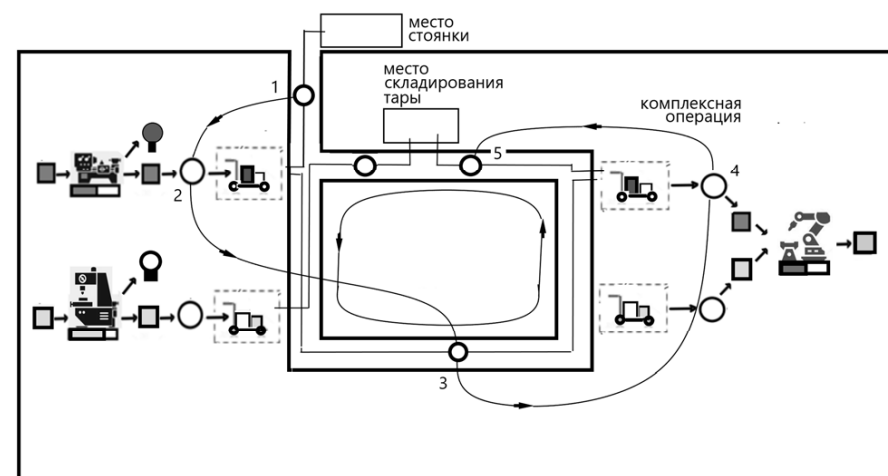


Рис. 1. Графическое представление имитационной модели

УДК 330.47

В. А. ШИРОЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.**В. А. НЕДЮХИН****Т. А. КОРОТКЕВИЧ**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**Аннотация**

Рассмотрены вопросы создания и анимации производственных процессов, в которых существенную роль играют процессы транспортировки изделий между различными технологическими операциями, выполняемыми на специальном станочном оборудовании. Особое внимание уделено моделированию и отработке законов управления внутрицеховым транспортом, которые могут быть использованы для построения специальной автоматизированной системы, позволяющей повышать эффективность функционирования производственной системы.

Ключевые слова:

имитационное моделирование, производственные процессы, анимация, внутрицеховые перевозки, управление транспортом.

Компьютерная визуализация результатов имитационного моделирования производственного процесса является важным инструментом для анализа, оптимизации и управления производственными процессами. Она позволяет создавать визуальные модели производственных процессов, что облегчает принятие решений, оптимизацию использования ресурсов и управление циклом производства.

При разработке имитационных моделей используются различные принципы их построения, достаточно широко описанные в специальной литературе. Наиболее приемлемыми для моделирования производственных процессов являются принципы агентного моделирования [1]. Выбор зависит от особенностей моделируемого объекта и поставленных задач его исследования [2].

В Белорусско-Российском университете для построения имитационных моделей производственных процессов создана специальная система визуального моделирования. Конструирование модели в этой системе осуществляется с использованием набора имеющихся элементов, собирая из них, как из детского конструктора, нужную технологическую схему. В формируемой схеме обязательно должны чередоваться заделы, изображаемые прямоугольниками, и операции, для обозначения которых используются упрощенные изображения станочного оборудования. В качестве заделов могут быть накопители деталей – материальные заделы; накопители информации – информационные заделы; накопители финансовых средств – финансовые заделы. У каждой операции на входе как минимум один материальный задел и на выходе только один материальный задел. Кроме материальных заделов, могут быть использованы как на входе, так и на выходе информационные заделы, с помощью которых

УДК 621.787

В. М. ШЕМЕНКОВ, канд. техн. наук, доц.**М. А. РАБЫКО****А. Н. ЮМАНОВА**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Аннотация**

Представлены результаты исследования влияния использования прикатодного магнитного поля и управления частотой тока на эффективность процесса упрочнения изделий из инструментальных материалов тлеющим разрядом.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, магнитное поле, частота тока, модифицирующая обработка, поверхностный слой, сталь.

Тлеющий разряд является одним из наиболее распространенных видов газового разряда, используемого в современной промышленности при реализации методов обработки различных материалов, вследствие его легкого получения и поддержания.

Формируемая в результате газового пробоя низкотемпературная плазма, в зависимости от рабочей среды в камере, является мощным инструментом модификации свойств поверхностей деталей, сочетающим в себе элементы как химических, так и физических факторов воздействия.

Как показала практика использования тлеющего разряда, при обработке различных изделий его использование может быть основной обработкой как при ионно-плазменном насыщении поверхности, так и дополнительной обработкой после классической термической обработки, такой как закалка [1].

На протяжении многих десятилетий в Белорусско-Российском университете различными группами ученых ведутся исследования по установлению влияния обработки тлеющим разрядом малой мощности, зажигаемым как в среде остаточных атмосферных газов, так и смеси инертных и реакционных или только инертных газов, на эксплуатационные характеристики поверхностных слоев изделий из различных материалов.

Однако данные исследования опирались на использование классического самостоятельного тлеющего разряда. Полученные результаты позволили получить оптимальные технологические параметры процесса упрочнения (напряжение, сила тока разряда и время обработки) для конкретных материалов, которые в большей степени не отвечают на вопросы влияния химического состава упрочняемых материалов на результаты.

В последние десять лет на кафедре «Технология машиностроения» сформировались новые направления, связанные с повышением эффективности энергетических и частотных параметров тлеющего разряда, зажигаемого в среде

остаточных атмосферных газов, за счет внедрения ряда инновационных подходов.

Одним из перспективных направлений является использование прикатодного магнитного поля для интенсификации энергетических параметров тлеющего разряда [2].

Как показала практика реализации предлагаемого метода упрочнения, использование прикатодного магнитного поля с магнитной индукцией от 40 до 60 мТл приводит к повышению силы тока на 50 %...70 % в зависимости от давления в камере. Повышение интенсивности силы тока позволило сократить время обработки, необходимое для достижения максимальной твердости и износостойкости, на 20 %...40 % в зависимости от упрочняемого материала [3].

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки для реализации указанного метода.

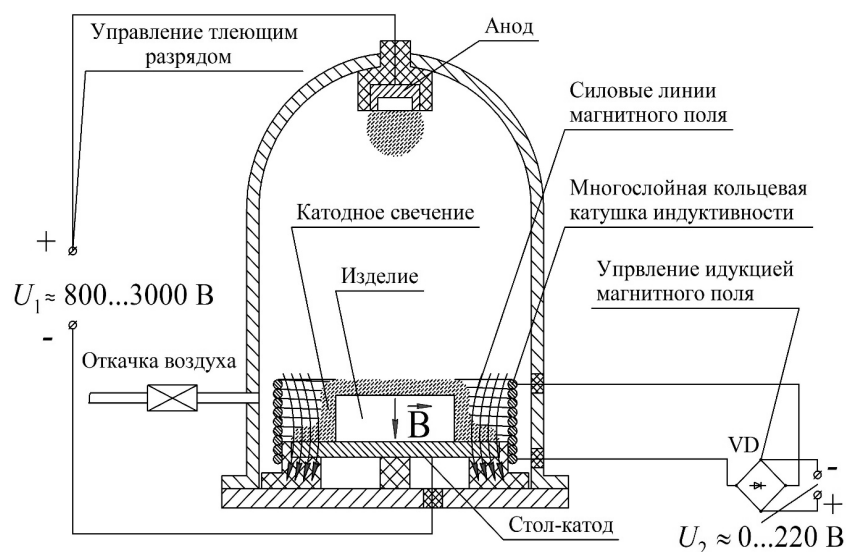


Рис. 1. Схема установки для реализации метода

Для обоснования эффективности описываемого способа упрочнения в табл. 1 и 2 приведены максимальные значения прироста твердости и износостойкости упрочняемых поверхностей как при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, так и без него.

Таким образом, использование прикатодного магнитного поля однозначно приводит к повышению эффективности процесса упрочнения тлеющим разрядом.

Изучение течения тока тлеющего разряда от анода к катоду позволило выявить, что в процессе упрочнения наблюдаются частотные колебания в пределах от 80 до 120 кГц (рис. 2).

Как видно из рис. 3, к 28 мин испытания пластины PNEA 110408 ВУТС, в сравнении со сторонним производителем, износ в 3,3 раза меньше, что говорит о том, что пластины PNEA 110408 ВУТС обладают большей износостойкостью в условиях прерывистого резания.

Современное и уникальное оборудование, используемое на базе Института технологии металлов НАН Беларуси, способное проводить депарафинизацию и спекание в одной камере за один цикл, позволило значительно сократить время на производство твердосплавной продукции (в 1,5–2 раза), а разработанная технология спекания – получить высокоэффективные твердосплавные пластины PNEA 110408 ВУТС, работающие в условиях прерывистого резания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Жигалов. – Минск, 2021.
2. Черняков, Ю. Д. Анализ влияния режимов спекания твердого сплава на физико-механические свойства и структурное состояние / Ю. Д. Черняков // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: сб. материалов VII Междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 12 мая 2023 г. – Гродно: ГрГУ им. Янки Купалы, 2023. – С. 115–121.
3. Капров, А. М. Вакуумные технологии удаления связки и спекания керамических и металлических материалов / А. М. Капров, Е. В. Вальков, S. K. Robinson // Вакуумная техника, материалы и технология: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – Москва: Сокольники, 2014. – С. 109–119.
4. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – Москва, 1976. – 264 с.

Контакты:

yuchi.osn@gmail.com (Черняков Юрий Дмитриевич);

jigalov6@mail.ru (Жигалов Анатолий Николаевич);

riv20000@gmail.com (Кубраков Илья Владимирович).

Y. D. CHERNYAKOV, A. N. ZHIGALOV, I. V. KUBRAKOV

TECHNOLOGICAL FEATURES OF DEWAXING IN A VACUUM FURNACE IN ONE CYCLE WITH THE SINTERING PROCESS

Abstract

The sintering process is conditionally divided into dewaxing and sintering directly. Dewaxing is often distinguished as its own cycle, however, there are methods of dewaxing and sintering in one furnace chamber. The Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus has installed modern and unique equipment capable of carrying out both processes in one chamber and producing highly efficient carbide tools.

Keywords:

hard alloy, dewaxing, sintering.

Технологическая реализация процесса депарафинизации на вакуумных печах, установленных на базе ИТМ НАН Беларуси, связана с наличием реторты, которая не позволяет оседать продуктам сгорания парафина на стенках камеры путем постоянной откачки газов в ловушки для парафина (см. рис. 2). Откачка вакуума при использовании ловушек реализуется роторно-пластинчатым насосом по отдельной линии, что препятствует загрязнению вакуумной системы. Наличие водного контура ловушек парафина позволяет улавливать и скапливать продукты сгорания парафина в процессе депарафинизации путем циркуляции холодной воды, а при необходимости в водный контур подается горячая вода, что позволяет быстро и практически полностью удалить парафин из ловушек за короткий промежуток времени.

Депарафинизация и переход к процессу спекания на данной установке осуществляются следующим образом: спрессованные твердосплавные заготовки загружаются в печь, закрывается стопорное кольцо, включается роторно-пластинчатый насос, открываются клапаны ловушек парафина и происходит нагрев со скоростью 2...4 °С/мин. Данная скорость нагрева необходима для предотвращения растрескивания твердого сплава в результате выхода паров парафина во время процесса депарафинизации. При достижении температуры окончания депарафинизации 650 °С...720 °С устанавливается выдержка нагрева печи, для чего производят закрытие ловушек парафина и открытие основной линии вакуумной системы, включение насоса Рутса и начало нагрева масла диффузионного насоса. Окончание выдержки сопровождается нагревом масла диффузионного насоса до температуры 262 °С и открытием клапана глубокого вакуума.

Институтом технологии металлов НАН Беларуси разработана технологическая схема спекания высокоэффективных твердосплавных пластин PNEA-110408 BYTC составом T5K10, работающих в условиях прерывистого резания.

Проведен сравнительный анализ износостойкости твердосплавных пластин PNEA 110408 BYTC со сторонним производителем PNEA 110408. Режимы испытания при фрезеровании следующие: глубина резания $t = 1,5$ мм; подача $S = 0,15$ мм/зуб; скорость резания $V = 110$ м/мин; обрабатываемый материал – ВЧ50. В результате получены данные, представленные на рис. 3.

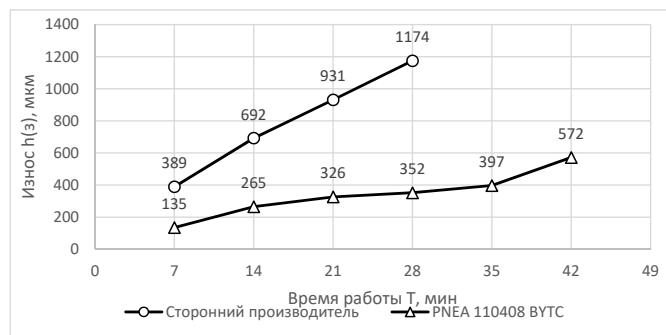


Рис. 3. Результаты исследования износа твердосплавных пластин PNEA 110408 BYTC и стороннего производителя

Табл. 1. Максимальные значения микротвердости упрочненных поверхностей изделий из различных материалов

Сталь	Твердость образцов после упрочнения тлеющим разрядом, МПа	Твердость образцов после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, МПа	Приращение твердости, %
5X3B3MFC	6180	7100	11...13
X12MФ	9960	10920	7...9
4X4BMFC	7190	7800	8...10

Табл. 2. Максимальные значения коэффициентов износостойкости образцов из различных материалов

Сталь	Повышение износостойкости образцов после упрочнения тлеющим разрядом, %	Повышение износостойкости образцов после упрочнения тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем, %	Приращение износостойкости, %
5X3B3MFC	130,0...136,0	190,0...198,0	40...42
X12MФ	150,0...165,0	220,0...229,0	40...42
4X4BMFC	170,0...175,0	220,0...223,0	29...31



Рис. 2. Осциллограммы тока тлеющего разряда в процессе упрочнения

На основании выявленного поведения тока и теории скин-эффекта было предложено второе направление, заключающееся в разработке способа, позволяющего добиваться необходимых глубин упрочненных слоев для конкретных металлических материалов за счет регулировки и удержания частоты тока тлеющего разряда в пределах от 50 до 150 кГц.

Была реализована установка, обеспечивающая получение необходимых параметров частоты тока тлеющего разряда (рис. 3).

На основании теории формирования активного слоя, формируемого в металлическом проводнике, помещенном в электромагнитное поле, показано,

что глубина скин-слоя напрямую зависит от удельного электрического сопротивления материала проводника. В свою очередь удельное электрическое сопротивление зависит от легирующих элементов упрочняемых материалов. На основании этого проведены исследования влияния легирующих элементов на удельное электрическое сопротивление стали и получены оптимальные значения частоты тока тлеющего разряда, необходимые для получения определенной глубины упрочненного слоя для основных инструментальных сталей (рис. 4).

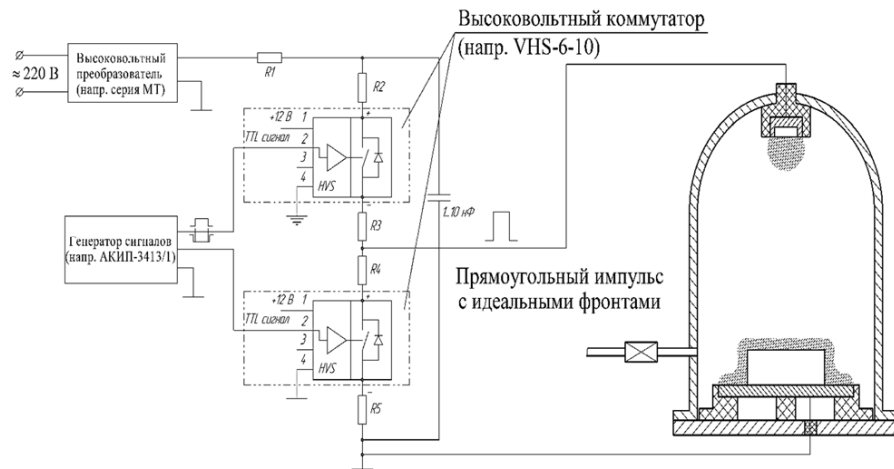


Рис. 3. Схема установки для реализации способа упрочнения

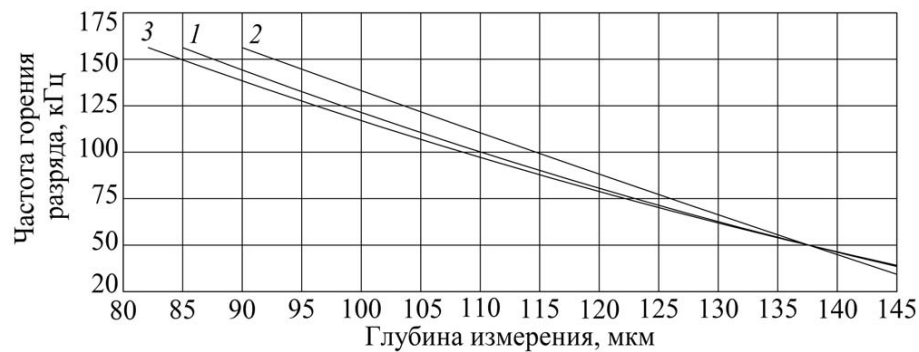


Рис. 4. Глубина упрочненного слоя образцов после обработки тлеющим разрядом при различных частотах течения тока: 1 – сталь 4Х4ВМФС; 2 – сталь Х12МФ; 3 – сталь Р6М5



Рис. 1. Вакуумная печь для спекания твердого сплава

Вакуумная система печи состоит из роторно-пластинчатого насоса (обеспечивает степень вакуума $1 \cdot 10^{-1}$ Па), насоса Рутса (обеспечивает степень вакуума $1 \cdot 10^{-2}$ Па) и диффузионного насоса (обеспечивает степень вакуума $1 \cdot 10^{-3}$ Па). Схематичное расположение вакуумной системы представлено на рис. 2.

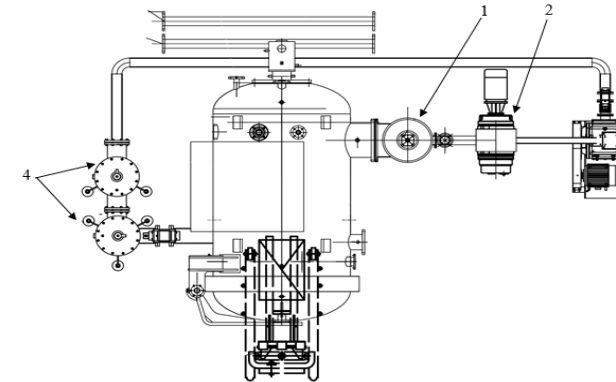


Рис. 2. Схематичное расположение систем вакуумной печи: 1 – роторно-пластинчатый насос; 2 – насос Рутса; 3 – диффузионный насос; 4 – ловушки для парафина

Для спекания приемлемой степенью вакуума, для полного протекания всех процессов, является $6 \cdot 10^{-3}$ Па. В то же время для процесса депарафинизации необходимость в глубоком вакууме отсутствует [4]. Роторно-пластинчатый насос способен обеспечить при полной загрузке вакуум степенью $1 \cdot 10^{-1}$ Па, что достаточно для предотвращения окисления графитовых нагревателей (не выше 50 Па) и обеспечивает полное протекание процессов депарафинизации.

УДК 621.9

Ю. Д. ЧЕРНЯКОВ**А. Н. ЖИГАЛОВ**, *д-р техн. наук, доц.***И. В. КУБРАКОВ**

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ
В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ ЗА ОДИН ЦИКЛ С ПРОЦЕССОМ СПЕКАНИЯ****Аннотация**

Процесс спекания условно делят на депарафинизацию и непосредственно спекание. Депарафинизацию часто выделяют как собственный цикл, однако существуют методы проведения депарафинизации и спекания в одной камере печи. На базе Института технологии металлов НАН Беларуси установлено современное и уникальное оборудование, способное проводить оба процесса в одной камере и получать высокоэффективный твердосплавный инструмент.

Ключевые слова:

твёрдый сплав, депарафинизация, спекание.

Спекание – процесс получения твёрдосплавных изделий с заданными характеристиками. Условно процесс спекания делят на процесс депарафинизации и непосредственного спекания. Депарафинизация – удаление связывающего материала (парафина), проводимое на низких температурах (650 °С...720 °С), а непосредственно спекание – окончательный процесс, проводимый на высоких температурах (1350 °С...1500 °С) [1].

Депарафинизацию часто выделяют как собственный цикл, который проводится в отдельной камере. Однако такой технологический прием достаточно времязатратный, т. к. требует охлаждения твердого сплава по окончании депарафинизации и последующего нагрева до температуры начала процесса спекания [2].

Проблема проведения депарафинизации связана с тем, что продукты сгорания парафина быстро диффундируют через нагреватели и теплоизоляцию и оседают на стенках камеры, которые оснащают водяным контуром, вследствие чего парафин стекает в специальный резервуар [3]. Однако такая система не позволяет полностью избавиться от парафина и требует постоянной очистки камеры и резервуара.

Процесс депарафинизации занимает в сумме 7...8 ч, затрачивая большое количество энергии (для нагревания и циркулирования воды для охлаждения). Для процесса спекания требуется или очистка камеры от парафина, или наличие дополнительной камеры.

Такая классическая технология спекания приводит к значительному удорожанию процесса спекания твердого сплава.

В ИТМ НАН Беларуси разработана, совместно с китайским производителем, и используется технология спекания твердого сплава за один цикл (рис. 1).

Таким образом, для получения глубины упрочненного слоя 100 мкм сталь 4Х4ВМФС необходимо упрочнять тлеющим разрядом с частотой тока, равной 113 кГц, сталь Х12МФ – с частотой 125 кГц, а сталь Р6М5 – 105 кГц.

В результате представленной информации можно сделать вывод о перспективности дальнейших исследований по двум указанным направлениям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом: монография / В. М. Шеменков [и др.]; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.: ил.
2. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого материала: пат. ВУ 19126 / В. М. Шеменков, М. А. Белая. – Оpubл. 30.12.2013.
3. **Рабыко, М. А.** Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2. – С. 23–31.
4. **Шеменков, В. М.** Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом: монография / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.: ил.

Контакты:

vshemenkov@yandex.ru (Шеменков Владимир Михайлович);
belay-marina@yandex.by (Рабыко Марина Александровна);
anuta994@mail.ru (Юманова Анна Николаевна).

V. M. SHEMENKOV, M. A. RABYKO, A. N. YUMANOVA**TECHNOLOGICAL ASPECTS OF USING GLOW DISCHARGE
TO STRENGTHEN PRODUCTS FROM INSTRUMENTAL MATERIALS****Abstract**

The results of a study of the influence of the use of a near-cathode magnetic field and control of the current frequency on the efficiency of the process of strengthening products from tool materials by a glow discharge are presented.

Keywords:

glow discharge, magnetic field, current frequency, modifying treatment, surface layer, steel.

УДК 621.794.61

Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ^{1,2}, канд. техн. наук, доц.

А. Ю. КОРОЛЕВ², канд. техн. наук, доц.

ДАЙ ВЭНЦИ^{1,2}

¹Инновационный международный центр научно-образовательного и коммерческого сотрудничества «Дело» (Минск, Беларусь)

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (Минск, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕДИЦИНСКОГО ВОЛНОВОДА

Аннотация

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния электролитно-плазменной обработки на состояние рабочих поверхностей ультразвуковых ступенчатых волноводов трубчатого типа: точность размеров, качество поверхности, блеск, параметр шероховатости Ra и коррозионную стойкость. Показано, что выполняются условия по достижению требуемого 7-го качества точности, на поверхности отсутствуют заусенцы, острые кромки и окалина, уменьшается параметр шероховатости до $Ra = 0,1$ мкм, повышается блеск на 60 % и возрастает коррозионная стойкость.

Ключевые слова:

точность размеров, шероховатость и блеск поверхности, коррозионная стойкость, технологические операции обработки.

Одним из наиболее эффективных методов повышения качества поверхности при производстве изделий медицинского назначения является электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая обеспечивает качественное полирование и глянцеование поверхности, удаление заусенцев, скругление острых кромок [1].

В работе исследовалась в качестве финишной операции ЭПО рабочих поверхностей ультразвуковых ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа (УСКВТТ), предназначенных для внутренней обработки кровеносных сосудов. Данные изделия длинномерные (до 800 мм), с малым наружным диаметром (от 1,5 до 1,0 мм) и изготавливаются из стали 12X18H9.

Технологический процесс изготовления УСКВТТ комбинированный и включает такие операции ОМД, как волочение, раздача и обжим. При выполнении данных операций с целью повышения пластичности и снижения предела текучести перед деформированием материал трубы подвергается закалке в воду с 1150 °С. Нагрев вызывает растворение карбидов хрома, а быстрое охлаждение фиксирует пересыщенный его твердый раствор. Выделение из аустенита при закалке исключено, т. к. скорость охлаждения велика. Достигаются высокие характеристики пластичности и $\sigma_s \sim 500$ МПа.

В ходе закалки на воздухе при $T = 1150$ °С с охлаждением в воде в результате тепловой коррозии – прямого воздействия кислорода на металл, на поверхности стали 12X18H9 образуется окалина – смесь оксидов. Образуются как простые окислы (оксид железа (II), оксид железа (III), оксид хрома (III) и оксид никеля),

способом можно удалить поддержку, поэтому желательно печатать с минимальным количеством поддержек, а лучше без них.

В заключение можно отметить, что печать с использованием полимерных гранул открывает еще большие возможности для производства. Хотя ассортимент филамента на рынке быстро растет, но он не сможет сравниться с огромным выбором и разнообразием гранулированных термопластов, которые стоят в 2–4 раза дешевле.

Применение технологии FGF будет способствовать снижению стоимости и времени производства габаритной и износостойкой оснастки, а также заготовок для функциональных изделий под последующую механическую обработку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства: Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.

2. RepRap (2019) (2020). Производство плавных нитей – RepRap. В: Reprap.org. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication. – Дата доступа: 12.09.2023.

3. Треногин, Д. Метод FGF как новый виток развития в экструзии полимеров / Д. Треногин // Аддитивные технологии. – 2022. – № 3. – С. 2–6.

chem.andrey.bryn@gmail.com (Чемодуров Андрей Николаевич);
evjenijabramov32@gmail.com (Абрамов Евгений Александрович);
sergoqa632@mail.ru (Есин Сергей Николаевич).

A. N. CHEMODUROV, E. A. ABRAMOV, S. N. ESIN

RESEARCH IN THE FIELD OF FGF TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract

The prospects for using FGF technology in additive manufacturing are considered. The advantages and disadvantages of the technology, ways of improvement and applicability are identified.

Keywords:

additive technologies, 3D-printing, FGF (Fused Granulate Fabrication), filament, screw extruder.

увеличивается. При использовании сопла меньше можно получить более гладкую поверхность и более детальную печать. Максимальный размер определяется размером наименьшего элемента печатаемой детали. Как правило, размер сопла не может превышать значения, которое в 2 раза меньше размера наименьшего элемента.

При необходимости может быть напечатана поддерживающая структура, позволяющая создавать «арки» в модели. Для достижения желаемых результатов может потребоваться постобработка изделия (шлифовка и полировка, окраска, добавление металлических или стеклянных включений).

Преимущества технологии FGF по сравнению с технологией FDM/FFF:

- термопластики в гранулах значительно дешевле, чем термопластики в нитях (филаментах);
- производительность под промышленные объемы производства – до 36 кг/ч и более, что в десятки и даже сотни раз быстрее, чем FDM;
- больше область построения – возможность создавать значительно более крупные детали и объекты. Практически нет ограничений по размерам объектов;
- более прочные детали по сравнению с FDM;
- непрерывная точная подача материала, поскольку экструдер отмеряет расплавленный материал, а не твердую нить;
- широкий спектр расходных материалов;
- материал можно модифицировать «в последний момент» – добавить цвет или определенные свойства;
- легко организовать повторное использование гранулированного термопластика;
- комбинация с другими методами производства;
- экологические преимущества: использование измельченных отходов.

Применяются и комбинированные установки для фрезерной обработки и 3D-печати в рамках одного станка (так называемое субтрактивное производство). Такие установки могут быть выполнены в следующих конфигурациях: портал с двумя балками, где на первой расположен FGF-экструдер, а на второй – шпиндель для пятиосевой обработки; портал с балкой и вертикальной сменой рабочего органа; роботизированная ячейка со сменой рабочего органа.

Несмотря на очевидные достоинства, у данной технологии существует и ряд недостатков. Одним из них является слабое качество поверхности, а именно высокая шероховатость, возникающая из-за значительной высоты слоя, что требует дальнейшей постобработки.

Так как для шнекового принтера кинематика и подготовка G-code схожа с филаментным оборудованием, то при печати гранулами возникают аналогичные проблемы, такие как засорение (*clogging*), пористость (*porosity*), коробление (*warping*), недостаточная экструзия и переэкструзия (*under-extrusion and overextrusion*).

При печати на FGF-принтерах чаще всего применяется только один материал, т. е. нет растворимых материалов поддержки. Так как только механическим

так и сложные оксиды ($\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, NiCr_2O_4 и др.). Так как поверхность полностью покрыта прочно сцепленной с ней окалиной темного цвета, то толщина ее слоя свыше 500 нм [2]. Состояние поверхности соответствует категории «А» по международному стандарту ИСО 8501-1:2007.

По техническим условиям к поверхности УСКВТТ предъявляются следующие требования: отсутствие царапин, заусенцев, загрязнений (окалины и следов смазки), размеры рабочих поверхностей должны соответствовать 7-му качеству точности, а параметр шероховатости поверхности Ra не должен превышать 0,1 мкм.

В качестве образцов для выполнения исследований использовались отрезки трубки диаметром $D = 1,69$ мм, полученной в результате волочения за один проход из исходной трубной заготовки диаметром $D = 1,8$ мм. Образец трубки перед проведением ЭПО подвергали закалке в воду от $T = 1150$ °С, в результате которой на его поверхности образовалась окалина темного цвета (рис. 1).



Рис. 1. Исходный образец

Для обработки образцов использовали режим, применяемый для полирования изделий медицинского назначения из коррозионно-стойких сталей [3, 4]: напряжение $U = 300$ В, электролит – 4 % сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, температура электролита $T = 90$ °С. Плотность тока при этом составляла $J = 0,10 \dots 0,15$ А/см². Также учитывались результаты, полученные в [3], в которой установлена экспериментальная зависимость между скоростью съема $V_{\text{эпо}}$ и исходным радиусом заготовки r_n , описываемая формулой $V_{\text{эпо}} = 0,0013 r_n^{-1,2315}$. Для этого подвергали обработке прутки исходного диаметра 1,5 мм, расположенный горизонтально на глубине 245 мм, в течение 180 мин, при этом через каждые 20 мин процесс останавливали и проводили измерения диаметра.

Целью исследования являлось установление продолжительности обработки, необходимой для полного удаления окалины, полирования (снижения параметра шероховатости) и придания поверхности образца однородного блеска, без существенного съема металла (не более 0,025 мм на сторону). Продолжительность обработки образцов изменялась в диапазоне от $t = 30$ с до $t = 270$ с с шагом $\Delta t = 30$ с. Для каждого образца выполнялись измерения наружного диаметра и параметра шероховатости поверхности. Диаметр образцов измерялся микрометром МК-25 (НПП «Челябинский инструментальный завод», РФ), параметр шероховатости поверхности – профилометром Marsurf PS1 («Mahr GmbH», ФРГ).

Результаты измерений представлены в табл. 1. Внешний вид обработанных образцов показан на рис. 2. Из представленных на рис. 2 фотографий видно, что

электролитно-плазменная обработка даже с минимальной продолжительностью ($t = 30$ с) приводит к существенному повышению качества поверхности.

Табл. 1. Результаты измерения диаметра и шероховатости поверхности образцов

Номер образца	Время обработки t , с	Измеренный диаметр D , мм	Параметр шероховатости поверхности Ra , мкм
Исходный	—	1,69	0,288
1	30	1,68	0,288
2	60	1,68	0,218
3	90	1,68	0,196
4	120	1,68	0,179
5	150	1,68	0,201
6	180	1,68	0,140
7	210	1,67	0,168
8	240	1,67	0,125
9	270	1,67	0,101
10	300	1,66	0,085

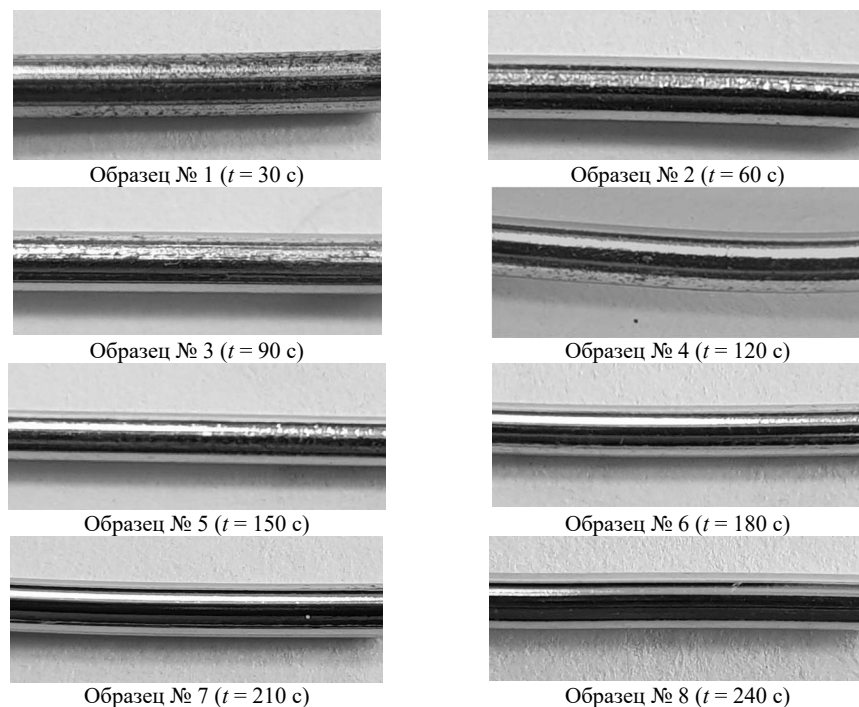


Рис. 2. Внешний вид образцов после электролитно-плазменной обработки ($\times 10$)

На рынке доступно множество материалов с широким спектром свойств – от PLA до высокотемпературных промышленных термопластов, таких как армированный нейлон и PEEK. Печать гранулами позволяет использовать множество различных материалов.

Пеллеты дешевле филамента не только потому, что исключается стадия формования прутка, но и потому, что пластик в форме гранул используется в литье под давлением и других видах производства, поэтому рынок гранул огромен, что удерживает цены на низком уровне.

3D-принтеры для FGF-технологии дополнительно оснащаются бункером и шнековым экструдером.

Для увеличения степеней свободы в передвижении печатающей головки шнековый экструдер можно интегрировать на робот-манипулятор.

Схема работы шнекового экструдера показана на рис. 1.

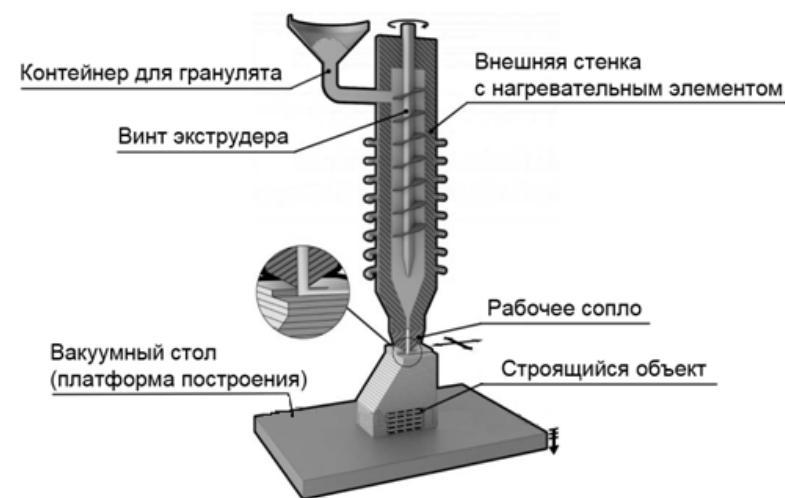


Рис. 1. Принципиальная схема работы шнекового экструдера FGF 3D-принтера

Изделие формируется на мобильной строительной платформе. Пластиковые гранулы подаются на вертикальный экструзионный шнек, который вращается, нагревает и спрессовывает гранулы до расплавленной однородной пластиковой массы. Масса продавливается через сменную насадку, где поток регулируется диаметром и формой канала.

Пластиковая масса подается через сопло с постоянной скоростью, и создается поперечное сечение модели CAD. После каждого слоя строительная платформа опускается и добавляется следующий слой.

Таким образом, объем подачи пластика в единицу времени можно изменять различными размерами сопла. Если использовать сопло большего диаметра, то процесс печати становится быстрее и дешевле, а прочность изделия

УДК 621.77.04

А. Н. ЧЕМОДУРОВ**Е. А. АБРАМОВ****С. Н. ЕСИН**

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ FGF-ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА****Аннотация**

Рассматриваются перспективы применения FGF-технологии в аддитивном производстве. Выявляются достоинства и недостатки технологии, пути совершенствования и применимость.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, 3D-печать, FGF (Fused Granulate Fabrication), филамент, шнековый экструдер.

Аддитивные технологии с начала своего появления использовались преимущественно для изготовления опытных образцов, т. к. назывались технологиями быстрого прототипирования. Сегодня данные технологии применяются для изготовления оснастки и функциональных изделий.

Самая старая технология 3D-печати – это технология FDM/FFF (печать методом послойного наложения). До сих пор эта технология широко используется и продолжает развиваться [1, 2]. Тем не менее она имеет свои недостатки.

В данной области альтернативной технологией является относительно молодая технология – технология FGF (Fused Granulate Fabrication, послойное наплавление из полимерных гранул) [3].

Любой пластиковый филамент для 3D-печати производится из гранул – гранул пластика, которые расплавляются на производстве, где из них формуется пластиковая проволока – пруток, который наматывается в бобины и продается как известный нам пластиковый филамент – самый известный и распространенный материал для 3D-печати.

Применение гранул напрямую, минуя стадию промышленного производства прутка, позволяет сэкономить от 65 % до 90 % стоимости материала для печати. При наличии на производстве оборудования для измельчения пластика и экструзии прутка можно снизить стоимость печати еще меньше, перерабатывая неудачные принты в сырье, что еще больше снижает себестоимость конечного продукта и уменьшает количество отходов практически до нуля. Это не только выгодно, но и экологично.

Печать с использованием гранул, также известная как моделирование из плавленных гранулятов или прямая экструзия, не является чем-то новым, но переживает возрождение популярности, обусловленное растущим спросом на более крупные 3D-принтеры и заинтересованностью в уменьшении количества отходов.

Однако при этом наблюдаются локальные точечные очаги окалины, которые полностью удаляются после обработки продолжительностью $t = 210$ с и больше. Таким образом, для полного удаления окалины и полирования необходима ЭПО поверхности продолжительностью $t = 210...240$ с. При этом съем металла составляет 0,01 мм на сторону, благодаря которому обеспечивается требуемый диаметральный размер с 7-м качеством точности наружных рабочих поверхностей УСКВТТ. Параметр шероховатости поверхности Ra уменьшается с 0,288 до 0,125...0,101 мкм.

Также ЭПО придает требуемый эстетичный вид поверхности изделия. Данный параметр оценивался измерением блеска поверхности после ЭПО. Образцы – пластины из стали 12X10H9 с размерами $25 \times 5 \times 1$ мм – закаляли с нагревом газовой горелкой при температуре $T = 1100$ °C...1150 °C в воду. Затем проводили ЭПО в течение $t = 240$ с (рис. 3).

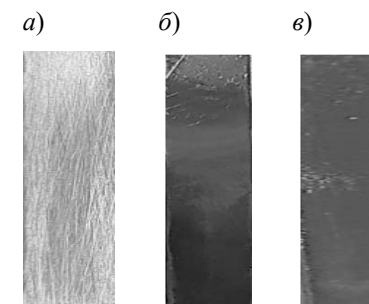


Рис. 3. Внешний вид поверхности образцов: *а* – исходный; *б* – после закалки; *в* – ЭПО ($\times 15$)

Для выполнения измерений применялись специально разработанные методика и приспособление. Результаты измерения блеска представляли в процентах (по отношению к эталону). Разработанная методика основана на измерении яркости параллельного пучка света, отражённого от исследуемой поверхности. Схема измерения представлена на рис. 4. В качестве источника света использовался лазерный светодиод, излучающий красный свет с длиной волны 635...670 нм с яркостью свечения 10 лм. Приемником света являлся фотодиод BPW21. Яркость отраженного света определялась по выходному напряжению на фотодиоде. Эталонем взят плоский отражатель – оптическое стекло с алюминиевым напылением с отражательной способностью больше 99,5 %.

Для эталона напряжение на фотодиоде составляло $U = 100$ мВ. Принималось, что при таком значении напряжения блеск поверхности составляет $\theta = 100$ %. Соответственно, измеряемые значения блеска образцов из стали 12X18H9 в процентах определялись пропорционально полученному на выходе из фотодиода значению напряжения.

Напряжение на фотодиоде в эксперименте с исходным образцом без ЭПО составило $U = 2,4$ мВ, что соответствует блеску $\theta = 2,4$ %, а для образца после

ЭПО соответственно $U = 62$ мВ и $\theta = 62$ %. Структура поверхности этих образцов получена на микроскопе Altam1 MET1 (РФ) и представлена на рис. 5. Очевидно, что чем выше шероховатость поверхности, тем меньше её блеск.

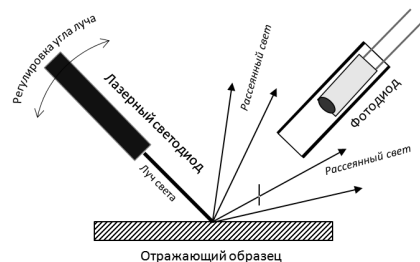


Рис. 4. Схема измерения блеска поверхности

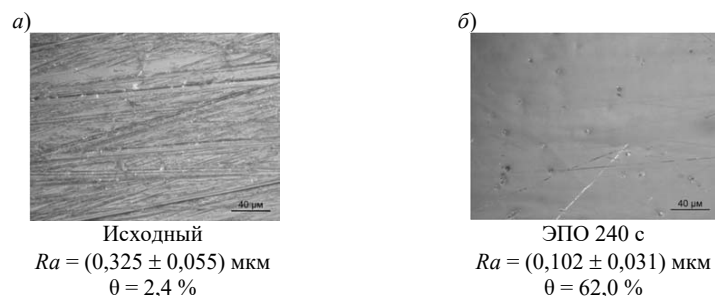


Рис. 5. Структура поверхности образца до (а) и после (б) ЭПО

УСКВТТ должен быть коррозионно-стойким в условиях эксплуатации, хранения и транспортирования. Исследования коррозионной стойкости выполнялись путем снятия поляризационных кривых в потенциодинамическом режиме. Для этого использовался потенциостат-гальваностат ПИ-50-Pro (ООО «Элинс», РФ) с подключенной электрохимической ячейкой. Потенциостат подключался к персональному компьютеру и управлялся специализированной программой PS Pack 2. Для получения поляризационных кривых использовалась трехэлектродная электрохимическая ячейка. Электрохимическая ячейка включала образец, являющийся рабочим электродом, и систему измерения, состоящую из вспомогательного платинового электрода марки ЭПВ-1СР-100, хлор-серебряного электрода сравнения и электролитического ключа. Измерения проводились в зоне образца размером 1 см^2 при комнатной температуре ($T = (20 \pm 1) ^\circ\text{C}$). При проведении исследований скорость изменения потенциала составляла $0,5 \text{ мВ/с}$. В качестве рабочего электролита использовался 0,9-процентный раствор NaCl в воде.

Потенциалы питтингообразования определялись из потенциодинамических кривых как потенциал начала резкого роста тока. Результаты представлены в табл. 2 в сравнении с образцом после шлифования.

Разрабатываемые порошки благодаря своим характеристикам способны успешно применяться для создания специальных покрытий и формирования тонкостенных изделий методами газотермического напыления, а также использоваться для изготовления трехмерных объектов способом СЛС, обеспечивая при этом уровень эксплуатационных характеристик выше, чем у изделий, изготовленных из серийных порошков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Research and Development of Additive Manufactured Bladed Disks [Electronic resource] / J. A. Bayliff [et al.]. – Mode of access: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/250277/250277.pdf>. – Date of access: 29.06.2019.
2. Laser Metal Deposition as Repair Technology for a Gas Turbine Burner Made of Inconel 718 / T. Petrat [et al.] // Physics Procedia. – 2016. – Vol. 83. – P. 761–768.
3. Madara, S. R. Review of Recent Developments in 3-D Printing of Turbine Blades / S. R. Madara, Ch. P. Selvan // European Journal of Advances in Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4 (7). – P. 497–509.
4. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов: монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Белорус.- Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
5. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов: монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 420 с.: ил.

Контакты:

5trannik@tut.by (Федосенко Алексей Сергеевич);
lovshenko2014@yandex.ru (Ловшенко Федор Григорьевич);
capsloock3333@mail.ru (Оленцев Алексей Сергеевич);
Ilaa10319@gmail.com (Андреев Илья Константинович).

A. S. FEDOSENKO, F. G. LOVSHENKO, A. S. OLIENTSEVICH, I. K. ANDREYEU

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF MECHANICALLY ALLOYED POWDERS FOR THE FORMATION OF PARTS IN THE FORM OF SHELLS AND PRODUCTION OF PRODUCTS USING ADDITIVE METHODS

Abstract

The results of a study of mechanically alloyed powders based on iron and nickel intended for the formation of products by gas-thermal spraying, as well as selective laser melting (SLM), are presented. The phase composition, structure and properties of powders, as well as the structure and properties of plasma coatings and products obtained by the SLS method, have been established.

Keywords:

reaction mechanical alloying, additive technologies, mechanically alloyed powders, phase composition, metal powders, microstructure, hardness, heat resistance.

Испытания на абразивный износ показали, что покрытия из разработанных порошков по износостойкости до 1,7 раза превосходят покрытия из серийных порошков аналогичного химического состава.

Микроструктура и свойства материалов, полученных способом селективного лазерного сплавления (СЛС).

Разработанные механически легированные порошки, содержащие синтезированные ультрадисперсные частицы термодинамически стабильных упрочняющих фаз, оказывают на микроструктуру образцов, полученных способом СЛС, существенный модифицирующий эффект аналогично слоям, формируемым газотермическим напылением. В данном случае это выражается в существенном снижении среднего размера поперечного сечения зерен материала. Так, образцы из серийного порошка состоят из крупных кристаллов с размером в поперечном сечении до 160 мкм, а образцы, полученные из механически легированных порошков, имеют размер зерна с поперечным сечением не более 40 мкм (рис. 3).

Следует отметить, что в образцах из механически легированных порошков отсутствуют сквозные столбчатые кристаллы, проходящие через все тело образца. Каждое зерно имеет границы раздела с соседними зёрнами, а угол разориентирования кристаллов относительно друг друга превышает 5°.

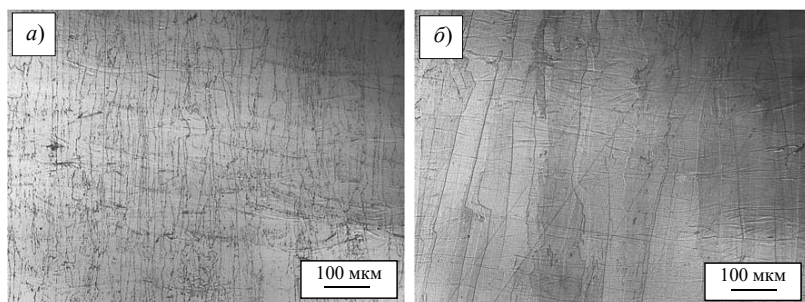


Рис. 3. Микроструктура отожженных образцов, полученных способом селективного лазерного сплавления: а – механически легированный порошок; б – серийный материал

Стали, полученные способом СЛС с использованием разработанных механически легированных порошков, превосходят образцы сталей из серийно выпускаемого материала близкого химического состава по твердости как в состоянии непосредственно после послойного синтеза, так и после длительного отжига при температурах до 900 °С.

Заключение. Представленные результаты являются базой для разработки широкой номенклатуры механически легированных порошков на основе железа и никеля. Также они служат фундаментом для создания порошковых материалов на основе других металлов, таких как алюминий, медь, титан, которые активно используются в современной промышленности, включая область аддитивных технологий.

Табл. 2. Потенциал коррозии $E_{корр}$, плотность тока коррозии $i_{корр}$, потенциал питтингообразования $E_{питт}$ исследованных образцов

Образец	$E_{корр}$, мВ	$i_{корр}$, А/см ²	$E_{питт}$, мВ
ОМД + ТО + шлифование	–176	$0,65 \cdot 10^{-8}$	+38
ОМД + ТО = ЭПО	–188	$0,22 \cdot 10^{-8}$	+392

Анализ потенциодинамических кривых показывает, что наибольшие значения потенциала питтингообразования $E_{питт}$ достигаются для образцов после ЭПО. Несмотря на относительно высокую плотность тока коррозии, образец после ЭПО обладает высоким потенциалом питтингообразования. Полученные результаты сравнительных испытаний свидетельствуют о достаточно высоких защитных свойствах поверхности, сформированной в результате ЭПО, которая способна надежно противостоять коррозии в условиях хранения, дезинфекции, стерилизации и эксплуатации изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Ю. Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю. Г. Алексеев, В. Н. Страх, А. Ю. Королев // Литье и металлургия. – 2005. – №. 4. – С. 180–187.
2. Пояркова, Е. В. Влияние высокотемпературного нагрева на структуру поверхностных окислов нержавеющей сталей / Е. В. Пояркова, А. В. Яхин // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, вып. 3. – С. 1267–1270.
3. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 188–195.
4. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталёва. – Минск: БНТУ, 2015. – 203 с.

Контакты:

y.g.aliakseyeu@gmail.com (Алексеев Юрий Геннадьевич);
korolyov129@gmail.com (Королев Александр Юрьевич);
dwq1616@163.com (Дай Вэньци).

YU. G. ALIAKSEYEU, A. YU. KOROLYOV, DAI WENQI

INFLUENCE OF ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF ULTRASONIC MEDICAL WAVEGUIDE

Abstract

The results of experimental studies of the influence of electrolytic plasma treatment on the condition of the working surfaces of ultrasonic stepped tubular waveguides are presented: dimensional accuracy, surface quality, gloss, roughness parameter Ra, and corrosion resistance. It is shown that the conditions for achieving the required 7th-grade of accuracy are met: there are no burrs, sharp edges or scale on the surface, the roughness parameter is reduced to $Ra = 0,1 \mu\text{m}$, gloss increases by 60 % and corrosion resistance increases.

Keywords:

dimensional accuracy, surface roughness and gloss, corrosion resistance, processing operations.

О. М. ВОЛЧЕК

Барановичский государственный университет (Барановичи, Беларусь)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛКОВ ПРЕССА И ПРЕССУЕМОЙ СМЕСИ****Аннотация**

Разработана усовершенствованная модель силового взаимодействия валков валкового пресса и прессуемой смеси. Описаны зависимости формирования боковой силы, действующей на вал со стороны прессуемой смеси, от минимального зазора между поверхностями валов, а также от параметров сцепления между частицами смеси и возрастания данного сцепления с ростом среднего осевого напряжения, насыпной плотности смеси и требуемой плотности плитки. Разработана методика оценки горизонтальной силы, действующей на вал со стороны прессуемой смеси.

Ключевые слова:

валковый пресс, порошок, смесь, прессование, межчастичное сцепление.

При описании зависимости боковой силы, действующей на вал валкового пресса со стороны прессуемой смеси, чаще всего используется модель Йохансона [1, 2].

В работе предложено усовершенствование данной модели, которое позволило комплексно учесть ряд особенностей моделируемого процесса. Согласно этой модели, область контакта материала с валом разделяется на три зоны (рис. 1).

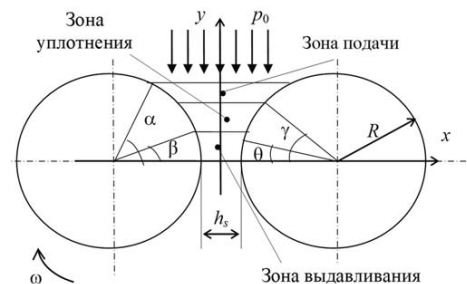


Рис. 1. Схема прессования смеси

На рисунке приняты следующие обозначения: R – радиус вала; p_0 – давление подачи; h_s – зазор между поверхностями валов; ω – угловая скорость вращения валов; θ – текущий угол, изменяющийся от 0 до α ; α – угол, определяющий начало зоны подачи; γ – угол, определяющий границу между зонами подачи и уплотнения; β – угол, определяющий границу между зонами уплотнения и выдавливания. Описание вальцевания осуществляется в декартовых координатах. Ось y вертикальна, равноудалена от поверхностей соседних валов и

Покрyтия, полученные плазменным напылением.

Покрyтия из разработанных механически легированных порошков отличаются микроструктурой, типичной для данного вида материалов, которая состоит из плотно уложенных и сильно деформированных частиц, превращающихся при ударе о поверхность подложки в пластины толщиной до 3 мкм и длиной 20...30 мкм. Формируемые слои сохраняют равномерное на субмикрoкристаллическом уровне распределение всех элементов (рис. 2).

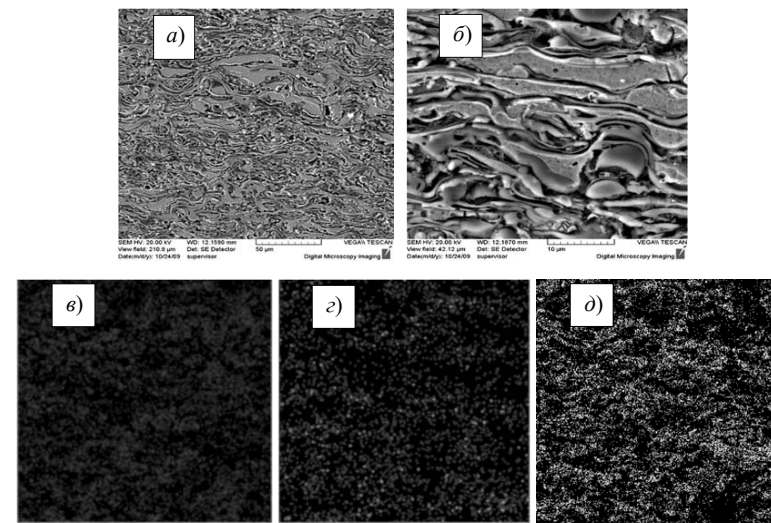


Рис. 2. Микроструктура (а, б) и распределение элементов Ni (в), Al (г), O (д) в покрытии Н90Ю10-ДУ

Формируемые покрытия имеют фазовый состав и структуру, соответствующие составу и структуре напыляемых механически легированных порошков. Присутствующие в составе матрицы равномерно распределенные ультрадисперсные частицы синтезированных термодинамически стабильных фаз в виде оксидов и карбидов оказывают на кристаллизующийся металл существенный модифицирующий эффект. Являясь центрами кристаллизации, они создают условия для получения микроструктуры с размером зерен менее 300 нм, разделенных на блоки величиной не более 100 нм, по границам которых распределены ультрадисперсные частицы оксидов и карбидов размером не более 30 нм.

В покрытиях из порошков сталей мартенситного класса основой выступает мартенсит, в покрытиях из аустенитных сталей – аустенит и небольшое количество мартенсита. Основой никелевых покрытий служит твердый раствор легирующих элементов в никеле, упрочняющие фазы – ультрадисперсные включения интерметаллидов системы «никель – алюминий» и оксидов алюминия.

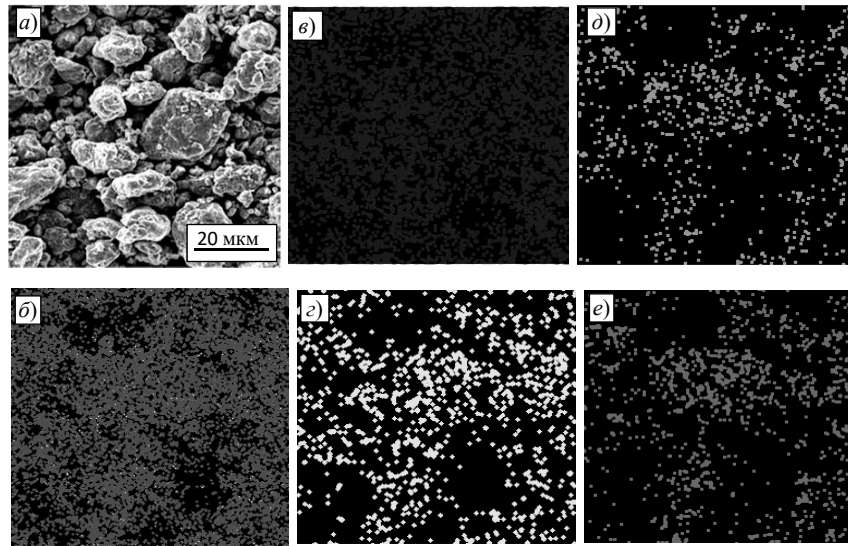


Рис. 1. Топография поверхности частиц порошка 12X18H10–(Ni₂O₃–Al) (СЭМ) и распределение основных элементов Fe (б), Cr (в), Ni (д), Al (е), O (е) в них: а – топография поверхности частиц; распределение интенсивности рентгеновского излучения

Все полученные материалы отличаются комплексным упрочнением. Решающее значение имеют зернограничный и дисперсный механизмы упрочнения. Синтезированные наноразмерные фазы карбидов и оксидов отличаются высоким значением модуля сдвига и обеспечивают высокую стабильность границ зерен и субзерен. Это определяет высокую твердость и жаропрочность порошков при температурах до 0,85T_{пл. основы} (табл. 1).

Табл. 1. Фазовый состав механически легированных порошков

Обозначение	Фазовый состав		
	равновесный	механически легированных порошков	механически легированных порошков, подвергнутых термообработке (T= 0 9T _{пл.})
40X13	<u>Fe_α(Cr)</u> , Cr ₇ C ₃	<u>Fe_α</u> , Fe _α (C), Fe _γ (C), (Fe, Cr), Fe ₂ C	<u>Fe_α</u> , Fe _α (C), Fe ₂ C, FeC, CrC
12X18H10	<u>Fe_γ(Cr, Ni)</u> , Cr ₇ C ₃	<u>Fe_γ(Cr, Ni)</u> , Fe _α (Ni), Fe _α (C), (Fe, Cr), FeNi ₃ , Fe ₂ C, Ni	Fe _γ (Cr, Ni), Fe ₃ C
H90Ю10	<u>Ni(Al)</u> , Ni ₃ Al, Al ₂ O ₃ , Al ₄ C ₃	<u>Ni(Al)</u> , Ni ₃ Al, NiAl, Al	<u>Ni(Al)</u> , Ni ₃ Al, Al ₂ O ₃
H90Ю10-(Ni ₂ O ₃ -Al)	<u>Ni(Al)</u> , Ni ₃ Al, Al ₂ O ₃ , Al ₄ C ₃	<u>Ni(Al)</u> , Ni ₃ Al, NiAl, Al, Ni ₂ O ₃	<u>Ni(Al)</u> , Ni ₃ Al, Al ₂ O ₃

Примечание – Подчеркиванием выделены соединения, формирующие основу исследуемых материалов

направлена противоположно движению порошковой смеси. Ось x горизонтальна и проходит через центры соседних валов. Ось z направлена перпендикулярно плоскости схемы. Толщина валов (размер вдоль оси z) H .

Зона подачи. В данной зоне зависимость среднего осевого давления в прессуемой смеси от угла θ описывается функцией

$$\sigma(\theta) = \left[\sigma_{\alpha} - w_{\text{н}} \sigma_{\gamma} \int_{\theta}^{\alpha} Q_{2\text{н}}(\zeta) \exp \left(\int_{\zeta}^{\alpha} Q_{1\text{н}}(\eta) d\eta \right) d\zeta \right] \exp \left(- \int_{\theta}^{\alpha} Q_{1\text{н}}(\eta) d\eta \right). \quad (1)$$

Здесь введены функции угла θ

$$Q_{1\text{н}}(\theta) = \left(\frac{(1 + \sin \delta_{\text{н}})(\sin \theta - f_{\text{н}} \cos \theta)}{(1 - \sin \delta_{\text{н}})(1 + f_{\text{н}} \operatorname{tg} \theta)} - \sin \theta \right) \frac{1}{1 + s - \cos \theta};$$

$$Q_{2\text{н}}(\theta) = \left(\frac{\sin \theta - f_{\text{н}} \cos \theta}{1 + f_{\text{н}} \operatorname{tg} \theta} + \sin \theta \right) \frac{1}{1 + s - \cos \theta} \quad (2)$$

и комбинация констант

$$w_{\text{н}} = \frac{2(1 + \mu_{\text{н}})c \cos \delta_{\text{н}}}{3(1 - \sin \delta_{\text{н}})}.$$

Здесь σ_{α} , σ_{γ} – значения среднего осевого напряжения для углов $\theta = \alpha$ и $\theta = \gamma$ соответственно; f – коэффициент трения между частицами порошковой смеси и поверхностью вала; μ – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) материала; δ – угол внутреннего трения; $s = h_s/(2R)$ – вводимый для краткости дальнейших записей конструктивный параметр; c – коэффициент пропорциональности, описывающий зависимость параметра межчастичного сцепления k от среднего осевого напряжения: $k = c\sigma$. Характеристики f , μ , δ являются функциями плотности порошковой смеси ρ . Нижний индекс «н» означает, что значение величины соответствует насыпной плотности $\rho_{\text{н}}$.

При известной зависимости $\sigma(\theta)$ определяются нормальное контактное давление p и сдвиговое напряжение τ , действующие со стороны смеси на вал:

$$p(\theta) = \frac{1}{1 + f_{\text{н}} \operatorname{tg} \theta} \left(\frac{3(1 + \sin \delta_{\text{н}})}{2(1 + \mu_{\text{н}})} \sigma + c \sigma_{\gamma} \cos \delta_{\text{н}} \right); \quad \tau(\theta) = f_{\text{н}} p(\theta). \quad (3)$$

Зона уплотнения. В данной зоне для величины σ получено следующее выражение:

$$\sigma(\theta) = \sigma_{\gamma} \exp \left(- \int_{\theta}^{\gamma} Q(\eta) d\eta \right). \quad (4)$$

Здесь введена функция угла θ

$$Q(\theta) = K \operatorname{tg} \theta \frac{1 + s - 2 \cos \theta}{1 + s - \cos \theta}, \quad (5)$$

где K – показатель прессования в модели Йохансена, являющийся характеристикой порошковой смеси.

После установления зависимости $\sigma(\theta)$ в зоне уплотнения можно описать изменение плотности смеси

$$\rho(\theta) = \rho_n \left(\frac{\sigma(\theta)}{\sigma_\gamma} \right)^{1/K}. \quad (6)$$

При известной зависимости среднего осевого напряжения от угла θ соответствующие зависимости $p(\theta)$ и $\tau(\theta)$ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \tau(\theta) &= \sigma(\theta) \sin \theta \left[2c \cos \theta - K(1+s-2\cos \theta) \left(\frac{3(1-\sin \delta_\theta)}{2(1+\mu_\theta)} - c \cos \delta_\theta \right) \right]; \\ p(\theta) &= \sigma(\theta) \left(\frac{3(1+\sin \delta_\theta)}{2(1+\mu_\theta)} + c \cos \delta_\theta \right) - \tau(\theta) \operatorname{tg} \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Нижний индекс « θ » означает, что в уравнении используется зависимость соответствующей характеристики от угла θ . Данная зависимость определяется путем подстановки функции (6) в известную экспериментальную зависимость характеристик от плотности $\delta_\rho = \delta(\rho) = \delta(\rho(\theta)) = \delta(\theta) = \delta_\theta$.

Зона вытягивания. В данной зоне уравнение функции $\sigma(\theta)$ имеет вид

$$\sigma(\theta) = \sigma_\beta \left[1 - w_{\text{пл}} \int_0^\beta Q_{2\text{пл}}(\zeta) \exp \left(\int_\zeta^\beta Q_{1\text{пл}}(\eta) d\eta \right) d\zeta \right] \exp \left(- \int_0^\beta Q_{1\text{пл}}(\eta) d\eta \right). \quad (8)$$

Функции $Q_{1\text{пл}}(\theta)$ и $Q_{2\text{пл}}(\theta)$ задаются соотношениями

$$\begin{aligned} Q_{1\text{пл}}(\theta) &= \left(\frac{(1+\sin \delta_{\text{пл}})(\sin \theta + f_{\text{пл}} \cos \theta)}{(1-\sin \delta_{\text{пл}})(1-f_{\text{пл}} \operatorname{tg} \theta)} - \sin \theta \right) \frac{1}{1+s-\cos \theta}; \\ Q_{2\text{пл}}(\theta) &= \left(\frac{\sin \theta + f_{\text{пл}} \cos \theta}{1-f_{\text{пл}} \operatorname{tg} \theta} + \sin \theta \right) \frac{1}{1+s-\cos \theta}. \end{aligned} \quad (9)$$

Также по аналогии с зоной подачи вводится комбинация значений характеристик

$$w_{\text{пл}} = \frac{2(1+\mu_{\text{пл}})c \cos \delta_{\text{пл}}}{3(1-\sin \delta_{\text{пл}})}.$$

Нижний индекс «пл» означает, что значение величины соответствует плотности плитки $\rho_{\text{пл}}$. В уравнении (8) σ_β – значение среднего осевого напряжения, соответствующее углу $\theta = \beta$.

Выражения для нормального давления и сдвигового напряжения имеют вид

Методика проведения эксперимента. Основными исходными компонентами для производства механически легированных порошков выступали классические, промышленно выпускаемые порошки ПЖ2М2, ПХ30, ПНК-ОНТ2, ПА4, а также технически чистые порошки хрома, молибдена и оксидов железа, никеля, молибдена. Поставщиком углерода служил порошок белого чугуна (Fe_3C).

С целью повышения твердости, износостойкости и жаропрочности изделий в ряд исследуемых композиций дополнительно вводились алюминий и один из оксидов Ni_2O_3 , Fe_2O_3 , MoO_3 , выполняющих роль поставщика кислорода. Основным продуктом их взаимодействия являются частицы Al_2O_3 .

Механическое легирование осуществлялось в механореакторе – энерго-напряженной вибромельнице с четырьмя рабочими камерами объемом 1 дм³ каждая.

Реализовано два вида аддитивных технологий. Результатом первого вида являлись покрытия, полученные плазменным напылением разработанных порошков. Процесс осуществлялся с использованием дугового плазмотрона. Плазмообразующие газы – воздушно-пропановая смесь. Во втором случае образцы получали методом селективного лазерного сплавления на принтере EP-M250.

Металлографический анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II SBH. Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре «ДРОН-3».

Результаты исследования.

Механическое легирование. Проведенные исследования позволили установить, что оптимальные значения переменных факторов, обеспечивающие возможность получения композиционных порошков с максимальной твердостью, пригодные для использования в области послойного синтеза, составляют: ускорение рабочих тел $a_n = 135 \dots 145 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; отношение рабочих тел к шихте $k = 10 \dots 12$; степень заполнения камеры рабочими телами $\epsilon = 75 \% \dots 80 \%$; время обработки $\tau = 8 \dots 10 \text{ ч}$.

Порошки состоят из частиц, основная часть которых имеет размер не более 80 мкм, при этом доля, пригодная для реализации процессов послойного синтеза, достигает 80 % от общей массы. Частицы имеют форму, близкую к сферической.

Условия механосинтеза, включающие многократно повторяющиеся акты дробления частиц и их объединения посредством наваривания друг на друга, способствуют активному протеканию процессов диффузии и взаимодействия между компонентами, что сопровождается формированием материала, гомогенного на субмикроструктурном уровне (рис. 1).

Результатом механохимического взаимодействия между компонентами обрабатываемой шихты являются, как правило, наноразмерные, зачастую рентгеноаморфные, соединения, основные из которых – оксиды, карбиды, интерметаллиды, а также твердые растворы.

УДК 55.09.43

А. С. ФЕДОСЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, д-р техн. наук, проф.

А. С. ОЛЕНЦЕВИЧ

И. К. АНДРЕЕВ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ СПОСОБАМИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА

Аннотация

Приведены результаты исследования механически легированных порошков на основе железа и никеля, предназначенных для формирования изделий газотермическим напылением и селективным лазерным сплавлением (СЛС). Установлены фазовый состав, структура и свойства порошков, а также структура и свойства плазменных покрытий и изделий, полученных методом СЛС.

Ключевые слова:

реакционное механическое легирование, аддитивные технологии, механически легированные порошки, фазовый состав, металлические порошки, микроструктура, твердость, жаропрочность.

Введение. Современные аддитивные технологии (АТ) позволяют производить уникальные изделия из большинства конструкционных материалов, в том числе из металлов и сплавов. Базой для получения изделий является цифровая модель, воплощение которой в трехмерное изделие реализуется с помощью универсального или специального оборудования, такого как робототехнические комплексы для сварки, установки плазменной, лазерной, аргонодуговой наплавки, оборудование газотермического напыления.

В настоящее время основной объем порошков, применяемых в области АТ, приходится на высоколегированные нержавеющие стали. Среди них наиболее часто применяют сплавы аустенитного класса [1–3], прочность которых зачастую уступает прочности материалов, полученных классическими способами. В то же время перспективным направлением применения аддитивных технологий является производство сложных деталей, способных работать при повышенных температурах в сочетании со значительными механическими нагрузками. В ближайшие 5–7 лет доля таких деталей в самолето-, ракетостроении и энергетике должна превысить 50 % от общего количества. Одна из ключевых характеристик материалов этого класса – высокая жаропрочность.

Перспективным направлением получения трехмерных изделий, отличающихся высокими прочностными характеристиками, является применение в качестве конструкционного материала жаропрочных порошков, получаемых по технологии реакционного механического легирования [4, 5].

$$p(\theta) = \frac{1}{1 - f_{\text{пл}} \operatorname{tg} \theta} \left(\frac{3(1 + \sin \delta_{\text{пл}})}{2(1 + \mu_{\text{пл}})} \sigma(\theta) + c \sigma_{\beta} \cos \delta_{\text{пл}} \right); \quad \tau(\theta) = -f_{\text{пл}} p(\theta). \quad (10)$$

Для использования решений (1), (4), (8) необходимо определить шесть констант: три угла α , γ , β и соответствующие этим углам значения среднего осевого напряжения σ_{α} , σ_{γ} , σ_{β} . Данные константы определяются исходя из следующих условий.

1. На границе области контакта ($\theta = \alpha$) задана осевая компонента тензора напряжений $\sigma_y(\alpha) = p_0$.

2. На этой же границе градиент среднего осевого напряжения принимается равным нулю: $\left. \frac{d\sigma}{d\theta} \right|_{\theta=\alpha} = 0$.

3. На границе зон подачи и уплотнения ($\theta = \gamma$) и на границе зон уплотнения и вытягивания ($\theta = \beta$) выполняются условия неразрывности напряжения σ .

4. Также при $\theta = \gamma$ выполняется условие неразрывности градиента среднего осевого напряжения.

5. При выходе плитки из области контакта ($\theta = 0$) осевая компонента тензора напряжений σ_y равна нулю.

В соответствии с перечисленными условиями первоначально вычисляется угол γ как решение нелинейного уравнения

$$Q_{1n}(\gamma) + w_n Q_{2n}(\gamma) = Q(\gamma). \quad (11)$$

При известном γ угол α определяется в результате решения нелинейного уравнения

$$w_n \left(1 - \int_{\gamma}^{\alpha} Q_{2n}(\zeta) \exp \left(\int_{\zeta}^{\alpha} Q_{1n}(\eta) d\eta \right) d\zeta \right) - \exp \left(\int_{\gamma}^{\alpha} Q_{1n}(\eta) d\eta \right) = w_n \left(1 + \frac{Q_{2n}(\alpha)}{Q_{1n}(\alpha)} \right). \quad (12)$$

Для нахождения угла β составляется уравнение вида

$$\int_0^{\beta} Q_{2\text{пл}}(\zeta) \exp \left(\int_{\zeta}^{\beta} Q_{1\text{пл}}(\eta) d\eta \right) d\zeta + \exp \left(\int_0^{\beta} Q_{1\text{пл}}(\eta) d\eta \right) = \frac{1}{w_{\text{пл}}}. \quad (13)$$

При известных значениях углов соответствующие значения среднего осевого напряжения вычисляются по формулам

$$\sigma_{\gamma} = - \frac{p_0 Q_{1n}(\alpha)}{c \cos \delta_n (Q_{1n}(\alpha) + Q_{2n}(\alpha))}; \quad \sigma_{\alpha} = \frac{2(1 + \mu_n)(p_0 + c \sigma_{\gamma} \cos \delta_n)}{3(1 - \sin \delta_n)};$$

$$\sigma_{\beta}(\theta) = \sigma_{\gamma} \exp \left(- \int_{\beta}^{\gamma} Q(\eta) d\eta \right). \quad (14)$$

Таким образом, решив нелинейные уравнения (11)–(13) и используя соотношения (14), определим константы α , γ , β , σ_{α} , σ_{γ} , σ_{β} . Подставив эти

константы в функции (1), (4), (8), установим явный вид зависимостей среднего осевого напряжения от угла θ в каждой зоне области контакта. Затем, используя соотношения (3), (7) и (10), получим для каждой зоны зависимости $p(\theta)$ и $\tau(\theta)$. Зная эти функции, вычислим горизонтальную силу, действующую на вал со стороны прессуемой смеси:

$$F_x = RH \int_0^{\alpha} (p \cos \theta + \tau_f \sin \theta) d\theta.$$

В качестве примера использования описанной методики получим зависимость силы F_x от расстояния h между поверхностями валов при следующих значениях исходных параметров: $R = 0,5$ м; $H = 0,1$ м; $p_0 = 1$ МПа. Прессуемый материал – насыпная плотность $\rho_n = 920$ кг/м³, плотность плитки $\rho_{пл} = 1840$ кг/м³. Экспериментальные данные о характеристиках данной смеси, аппроксимируются следующими функциями:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= 0,6 - 0,15 \sqrt{\frac{\rho - \rho_n}{\rho_{пл} - \rho_n}} - 0,25 \left(\frac{\rho - \rho_n}{\rho_{пл} - \rho_n} \right); \\ \mu &= 0,2 + 0,03 \sqrt{\frac{\rho - \rho_n}{\rho_{пл} - \rho_n}} + 0,07 \left(\frac{\rho - \rho_n}{\rho_{пл} - \rho_n} \right); \\ f &= 0,4 - 0,12 \sqrt{\frac{\rho - \rho_n}{\rho_{пл} - \rho_n}} - 0,08 \left(\frac{\rho - \rho_n}{\rho_{пл} - \rho_n} \right). \end{aligned}$$

Коэффициент, определяющий параметр межчастичного сцепления, $c = 0,2$. Параметр прессования $K = 3$.

На рис. 2 представлены результаты вычисления горизонтальной силы F_x в зависимости от расстояния h .

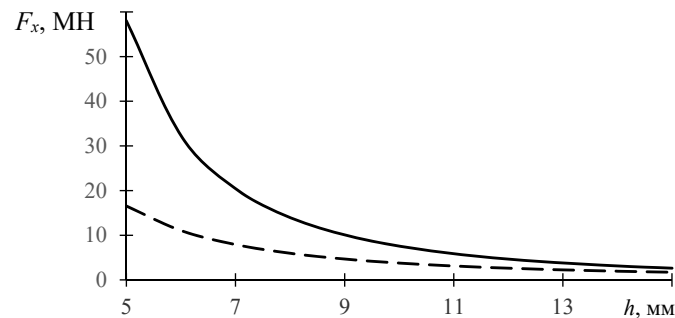


Рис. 2. Расчетная зависимость горизонтальной силы, действующей на вал со стороны прессуемой смеси, от зазора между поверхностями валов. Сплошная кривая – результаты использования усовершенствованной модели; пунктирная – расчет по упрощенной модели

первой ступени с поперечной подачей до диаметра 40 мм, и последующее удаление оставшегося материала с продольной подачей до диаметра 50 мм (рис. 6, в) обеспечивает минимальный путь резания в 98,5 мм.

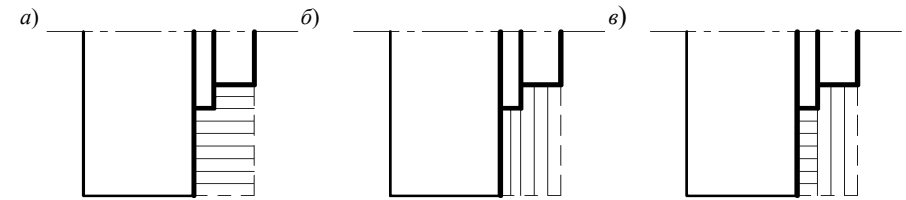


Рис. 6. Схемы удаления припуска: а – с продольной подачей; б – с поперечной подачей; в – рациональная схема удаления припуска

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:
– установлено, что, используя обработку с изменением направления подачи ступенчатых валов из заготовки в виде прутка для определенных геометрических размеров вала, можно получить сокращение основного времени по сравнению с традиционными схемами обработки;
– получен программный продукт, который позволяет установить минимально возможный путь резания и рациональную последовательность удаления материала для ступенчатого вала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жолобов, А. А.** Программирование процессов обработки поверхностей на станках с ЧПУ: учебное пособие / А. А. Жолобов, Ж. А. Мрочек, А. М. Федоренко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 339 с.
2. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ / В. И. Аверченков [и др.]. – Брянск: БГТУ, 2010. – 212 с.
3. Устройство числового программного управления NC-201: Руководство по эксплуатации. – Санкт-Петербург, 2005. – 80 с.: ил.
4. Руководство по программированию «Расширенное программирование». – Siemens AG, 2011. – 951 с.: ил.
5. **Федоренко, А. М.** Технология обработки на станках с ЧПУ: учебное пособие / А. М. Федоренко, А. А. Жолобов. – Минск: РИВШ, 2023. – 440 с.: ил.

Контакты:
fedorenko@bru.by (Федоренко Алексей Михайлович).

A. M. FEDARENKO

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF ROUGH TURNING MULTI-PASS PROCESSING

Abstract

The technique of constructing the trajectory of a cutting tool during multi-pass roughing of bar blanks on CNC machines, providing a minimum cutting path, is considered.

Keywords:

tool path, CNC machines, turning, multi-pass processing, cutting path.

а)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	D1	40	11		8	tnp		3	Нобщ	8	N1	2	N2
2	D2	50	12		4			2,9375	tnp1	2,5	tnp2	2,642857	7
3	D3		87										
4													
5					tnop		3	Нобщ	4	N1	3	N2	2
6								1,25	tnp1	2,666667	tnp2		2
7													
8													
9													
10	Smin	100	мм/мин										
11													
12													

б)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2				-2,66667	-5,33333		-8	-10	-12				
3				1	2		3	4	5				
4		81,71429	1							12		4	
5		76,42857	2							12		4	
6		71,14286	3							12		4	
7		65,85714	4							12		4	
8		60,57143	5							12		4	
9		55,28571	6							12		4	
10		50	7							12		4	
11		45	8							8		28	
12	Ходы X	40	9							8			
13				23,5	23,5	23,5	18,5	18,5				107,5	
14				23,5	23,5	23,5	70,5					98,5	
15										100			
16													

Рис. 4. Экранные копии программного модуля: а – лист исходных данных; б – лист промежуточного варианта

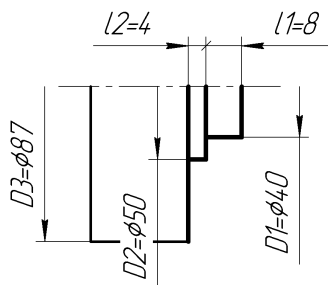


Рис. 5. Геометрические размеры исследуемого вала

Путь резания вала (см. рис. 5) в случае обработки только с продольной подачей составил 100 мм (рис. 6, а), только с поперечной подачей – 107,5 мм (рис. 6, б). Вариант обработки исследуемого вала, заключающийся в обработке

Для сравнения на рисунке представлена аналогичная зависимость, полученная по упрощенной модели без учета сцепления ($c = 0$), наличия зоны вытягивания ($\beta = 0$), изменения характеристик смеси при изменении плотности ($\delta(\rho) = \delta_n, f(\rho) = f_n$), наличия осевого напряжения σ_z ($\mu(\rho) = 0,5$).

Можно отметить значительное превышение расчетных оценок силы F_x , полученных на основе усовершенствованной модели, над соответствующими результатами использования упрощенной методики при малых зазорах между поверхностями валов. Данное обстоятельство обусловлено, главным образом, учетом в рамках усовершенствованной модели сцепления между частицами смеси (параметра k) и возрастания данного сцепления с ростом среднего осевого напряжения.

Таким образом, на основе разработанной усовершенствованной модели силового взаимодействия валков валкового пресса и прессуемой смеси создана эффективная методика оценки горизонтальной силы, действующей на вал со стороны прессуемой смеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Johanson, J. R.** A rolling theory for granular solids / J. R. Johnson // ASME, Journal of Applied Mechanics, Series E. – 1965. – Vol. 32, № 4. – P. 842–848.
2. **Johanson, J. R.** Reducing air entrainment problems in your roll press / J. R. Johanson // Powder and Bulk Engineering. – 1989. – P. 43.

Контакты:

leolya07@mail.ru, onti@sipr.by (Волчек Ольга Михайловна).

O. M. VOLCHEK

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORCE INTERACTION OF THE ROLLS OF THE PRESS AND THE PRESSED MIXTURE

Abstract

An improved model of the force interaction of the pressed mixture with the shafts of the shaft press has been developed. The dependence of the formation of the lateral force acting on the shaft from the side of the pressed mixture on the minimum gap between the surfaces of the shafts, as well as the parameters of adhesion between the particles of the mixture and the increase in this adhesion with an increase in the axial stress, the density of the bulk of the mixture and the required tile density is described. A method for estimating the horizontal force acting on the shaft from the side of the pressed mixture has been developed.

Keywords:

roller compactor, powder mixture, pressing, inter-particle cohesion.

УДК 661.152.099.2.023(045)

Н. А. ВЫСОЦКАЯ

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (Солигорск, Беларусь)

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В АГРЕГАТАХ БАРАБАННОГО ТИПА

Аннотация

Рассмотрено гранулирование методом окатывания и его стадии. Отмечено, что немаловажными параметрами, характеризующими образование гранул в процессе гранулирования методом окатывания, являются: количество ретура, наличие жидкой фазы, температура и время окатывания. Приведена технология получения гранул. Представлен расчет основных параметров барабанного гранулятора при гранулообразовании комплексных удобрений.

Ключевые слова:

гранулирование, барабан-гранулятор, жидкая фаза, технология.

К гранулированным материалам, используемым в сельском хозяйстве и других отраслях промышленности, предъявляются высокие требования по прочности, теплопроводности, влагопоглощению, гранулометрическому составу. Хорошим спросом пользуются комплексные калийные удобрения (NPK-удобрения). Во многих отраслях промышленности, в том числе в химической, хорошо себя зарекомендовали процессы получения гранул из тонкодисперсного начального продукта методом окатывания в барабанных грануляторах [1, 2].

Технология получения сложносмешанных комплексных минеральных NPK-удобрений методом окатывания включает в себя такие стадии, как:

- перемешивание смеси исходных компонентов (шихты) с мелкими частицами готового продукта, полученного в процессе нейтрализации и сушки шихты, и жидкостью (водой или плавом удобрения);
- получение гранулированного продукта из мелких частиц и измельчение комочков;
- непосредственно гранулирование методом окатывания в барабанном грануляторе, путем образования и упрочнения гранул при ударе о стенку барабана либо о неподвижный слой частиц;
- стабилизацию структуры гранул [3, 4] и упрочнение связей.

Образование гранул комплексных минеральных удобрений методом окатывания в барабанном грануляторе зависит от таких параметров, как количество ретура, наличие жидкой фазы, температура и время окатывания.

На первой стадии при смешении шихты и ретура в качестве связующего применяют разного рода жидкости, которые способствуют сцеплению частиц между собой.

На второй стадии капля жидкости (воды, плава удобрения) попадает в слой материала и под влиянием капиллярных сил начинает распространяться, при

1. Вводятся сведения о размерах заготовки и вала: диаметр первой ступени D1, диаметр второй ступени D2, диаметр прутка D3, мм; длины первой (l1) и второй (l2) ступеней, мм, в соответствии с рис. 3.

2. Вводятся сведения о технологических особенностях режущего инструмента: предельный снимаемый припуск за один рабочий ход в поперечном (t_{np}) и продольном (t_{np}) направлениях.

3. Посредством перебора формируется текущий вариант обработки.

4. Рассчитывается текущий путь резания.

5. Сравнивается путь резания текущего варианта с запомненным ранее. Если он меньше, то запоминается текущий.

6. Формируется новый вариант обработки: меняется характер подачи текущего рабочего хода с продольной на поперечную и наоборот.

7. Осуществляется повтор пп. 4–6 до окончания всех возможных вариантов обработки.

8. По окончании расчета формируется вариант обработки, имеющий минимальный путь резания.

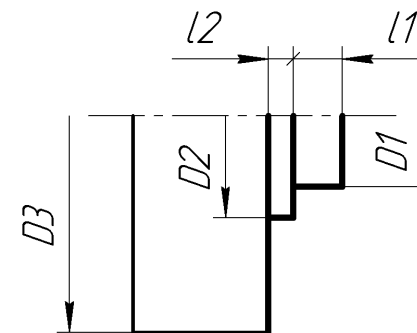


Рис. 3. Геометрические характеристики вала

На основании предложенного алгоритма была разработана программа для ПЭВМ в среде Excel с использованием VBA. Программа предназначена для поиска варианта и последовательности удаления припуска вала, состоящего из двух цилиндрических ступеней и обеспечивающего минимальную длину резания.

Интерфейс пользователя реализован посредством заполнения данными ячеек соответствующего листа книги (рис. 4, а).

Для расчета длины пути резания, а также для установления текущих габаритов заготовки используется лист «Сетка шагов» (рис. 4, б).

В результате расчета валов с произвольными размерами была подтверждена общепринятая рекомендация: для длинных деталей целесообразно выполнять многопроходное удаление припуска ходами вдоль оси заготовки, а для деталей типа дисков — поперечной подачей. Однако для вала с размерами, соответствующими рис. 5, установлен вариант обработки, обеспечивающий минимальный путь резания, сочетающий в себе комбинацию поперечных и продольных ходов обработки.

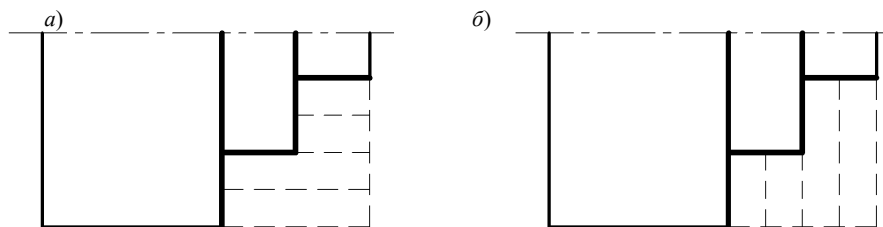


Рис. 1. Схемы удаления припуска при перемещении резца параллельно (а) и перпендикулярно (б) оси заготовки при обработке

Известны схема и соответствующие циклы токарной обработки, когда удаление припуска осуществляется параллельно контуру заготовки, но область их использования – заготовки с формой, приближенной к форме готовой детали (поковки, отливки), и для обработки заготовок из прутка они непригодны, т. к. в рассматриваемом случае приведут к потере основного времени вследствие большого числа ходов без обработки.

Вполне возможно, что в условиях обработки ступенчатых валов из заготовки в виде прутка могут возникнуть ситуации, когда с целью сокращения времени изготовления детали необходимо применять комбинацию обоих способов: на определенных участках следует удалять металл, двигаясь с продольной подачи, на других – с поперечной (рис. 2).

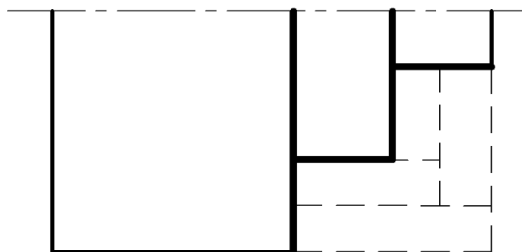


Рис. 2. Схема удаления припуска заготовки в случае комбинирования направлений перемещений резца

В настоящем исследовании в качестве критерия оптимальности выбран путь резания, который пропорционален основному времени обработки. Это позволило исключить из рассмотрения необходимость установления режимов резания.

Разработана методика формирования оптимальной траектории на основе простого перебора всех возможных вариантов и поиска среди них варианта с минимальным путем резания.

Порядок действий по поиску оптимальной траектории рассмотрим на примере обработки двухступенчатого вала.

этом заполняя поры между частицами. Жидкость перестает распространяться в материале, когда комок достигает предельной влагоемкости.

На третьей стадии идет окатывание и уплотнение гранул в барабанном грануляторе, который представляет собой цилиндр с распределительными лопастями на внутренней поверхности, вращающийся вокруг своей оси. Уплотнение частиц методом окатывания происходит при ударе о неподвижный слой материала или о стенку гранулятора. Комки, ударяясь и ссыпаясь, подвергаются уплотнению. Лишняя влага, находящаяся внутри комка, выдавливается на его поверхность, что позволяет дальнейшее присоединение к такому комку сухих частичек.

На последней стадии происходит стабилизация структуры гранул.

Гранулирование происходит в барабанном грануляторе. На 3-й сиввинитовой обогатительной фабрике ОАО «Беларуськалий» используется барабанный гранулятор производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», основные показатели которого представлены в табл. 1.

Табл. 1. Основные технические характеристики барабана-гранулятора, выпускаемого в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»

Показатель	Числовое значение	Показатель	Числовое значение
Производительность гранулятора $G_{пр}$, т/ч	32	Растворимость материала при 70 °С S , кг/кг	1
Средний диаметр получаемых гранул $d_{ср}$, мм	3	Диаметр гранул в начале процесса гранулирования d_0 , мм	1
Средний диаметр частиц вторичного продукта (рецикла) d_p , мм	0,8	Содержание жидкой фазы в начале процесса гранулирования P_0 , кг/кг	0,024
Диаметр барабана D , мм	3000	Содержание частиц вторичного продукта (рецикла) в шихте ξ	0,75
Насыпная плотность шихты ρ_n , т/м ³	1,08	Скорость скатывающихся частиц в слое материала $v_{ск}$, м/с	2

Коэффициент распределения гранул по размерам

$$\eta = \frac{1}{A + B d_{ср}}, \quad (1)$$

где A , B – установленные значения для удобрений при расчете коэффициента распределения гранул по размерам, $A = 0,144$; $B = -0,029$.

Распределение гранул по размерам определяется по формуле

$$f(d_{ср}) = \frac{\eta^n}{\Gamma(\eta)} \cdot \frac{1}{d_{ср}} \left(\frac{d_p}{d_{ср}} \right)^{\eta-1} \exp \left(-\eta \cdot \frac{d_p}{d_{ср}} \right), \quad (2)$$

где $\Gamma(\eta)$ – гамма-функция.

Произведя расчеты выражения (1), получили, что значение $\eta = 17,54 - \Gamma(\eta) = 9,5 \cdot 10^{13}$.

При подстановке числовых значений в формулу (2) установили, что содержание гранул комплексных НРК-удобрений со средним размером 3 мм – $f(3) = 0,651$.

Средний диаметр гранул продукта

$$d_{cp} = d_0 \exp \left[m \left(\frac{P}{1 - \xi + \xi(d_0/d_p)} - P_0 \right)^n \right], \quad (3)$$

где m, n – коэффициенты, соответствующие комплексным фосфорсодержащим удобрениям при разных значениях температур.

Для дальнейшего расчета основных технических характеристик барабанного гранулятора из уравнения (3) необходимо выразить содержание жидкой фазы P в шихте.

Влагосодержание шихты W определяется через значение P из формулы (3):

$$P = \frac{W + WS + i}{1 - WS - i},$$

откуда

$$W = \frac{P}{1 + S + PS}.$$

Расход воды с компонентами

$$G_B = \frac{G_{np} W}{1 - \xi}. \quad (4)$$

Расход рецикла

$$G_{rec} = G_{np} \left(\frac{\xi}{1 - \xi} \right). \quad (5)$$

Объемная производительность гранулятора

$$G = \frac{G_{np}(1 + W)}{\rho_n(1 - \xi)}. \quad (6)$$

Для определения коэффициента заполнения барабана Φ используется формула

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} (\varphi - \sin \varphi), \quad (7)$$

где φ – центральный угол обхвата в барабанном грануляторе, равный $\pm 108^\circ$.

Формула определения скорости подъема материала возле стенки барабанного гранулятора имеет вид

УДК 621.941.1

А. М. ФЕДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЧЕРНОВОЙ ТОКАРНОЙ МНОГОПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

Рассмотрена методика построения траектории режущего инструмента при многопроходной черновой обработке заготовок из прутка на станках с ЧПУ, обеспечивающая минимальный путь резания.

Ключевые слова:

траектория инструмента, станки с ЧПУ, токарная обработка, многопроходная обработка, путь резания.

Как известно, при проектировании обработки на станках с ЧПУ область, ограниченную контурами детали и заготовки, разделяют на отдельные зоны. Каждая зона, как правило, соответствует одному технологическому переходу и формируется в зависимости от требований к точности и шероховатости поверхности детали, а также возможностей режущего инструмента и способа крепления заготовки на станке. Все многообразие зон разделяют на два вида: зоны выборки объемов обрабатываемого материала и зоны контурной обработки. Зоны выборки служат для многопроходной обработки при больших съемах материала, а контурная – для прохода эквидистантно к участкам контура детали.

Наибольшую долю по времени обработки, как правило, составляют зоны выборки. При реализации обработки данных зон направление перемещения выбирают исходя из условия минимального числа рабочих ходов. Схемы перемещения резца, обеспечивающие это требование, зависят от размеров заготовки и способа ее крепления. При обработке заготовки в центрах минимальное число рабочих ходов достигается при перемещении резца вдоль оси заготовки. При обработке в патроне выбрать направление перемещения резца сложнее. Заготовки малой длины и большого диаметра следует обрабатывать при перемещении резца перпендикулярно оси детали, длинные заготовки – вдоль оси, а заготовки с большим количеством ступеней разного диаметра – как вдоль, так и поперек оси [1–5].

Рассмотрим типовые циклы многопроходной токарной обработки на примере системы ЧПУ NC-201 «Балт-Систем», производимой в Российской Федерации, и SINUMERIK «SIMENS», производимой в ФРГ, широко используемой на предприятиях Республики Беларусь.

Циклы многопроходной обработки реализуют последовательное удаление материала только параллельно или перпендикулярно оси заготовки, не допуская возможность комбинирования направления удаления припуска.

Типовые схемы перемещений резца при токарной обработке поверхностей заготовок из прутка с использованием циклов на станках с ЧПУ условно можно свести к двум схемам (рис. 1).

$$N = \frac{W_0 a K_0 - P_e \frac{b}{2}}{(b+c) \sin \alpha}. \quad (4)$$

При наличии двух оттяжек, наклоненных к горизонту под углом γ , усилие в каждой из них будет находится по формуле

$$N_1 = \frac{N}{2 \sin \gamma} = \frac{W_0 a K_0 - P_e \frac{b}{2}}{2(b+c) \sin \alpha \sin \gamma}. \quad (5)$$

Из всего этого можно сделать вывод, что в процессе эксплуатации вышки на ее элемент действуют различные виды нагрузок, которые влияют на ее устойчивость. Для минимизации данных воздействий необходимо производить расчет нагрузок, действующих на элемент вышки, в частности оттяжки, которые непосредственно используют для устойчивости вышки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Буровая_установка. – Дата доступа: 07.09.2023.
2. ООО «Геотехсервис». Информационно-измерительные системы в бурении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://leuza.ru/old/gti/bur/bur_u11.htm. – Дата доступа: 07.09.2023.
3. Буяновский, Н. И. Буровые машины и механизмы: монография / Н. И. Буяновский, В. А. Лесецкий. – Москва: НЕДРА, 1968. – 402 с.

Контакты:

onti@sipr.by, ipr@sipr.by (Тройнич Виталий Александрович);
onti@sipr.by (Коднянко Максим Юрьевич).

V. A. TROINICH, M. YU. KADNIANKA

DETERMINATION OF WIND LOADS ACTING ON OTTYAZHKI TOWERS DRILLING RIG

Abstract

The article provides information about the element of the drilling installation, namely the drilling rig. Reviewed in detail what types of towers there are, how they differ, and which type is most rationally applicable are. The question of the current types of loads on the elements of a drilling rig and how to calculate them to determine the force of influence of a given load were studied. As a result, it was concluded that it is necessary to calculate the impact of the load to minimize it.

Keywords:

drilling installation, drilling rig, stability, loads.

$$v_{\text{под}} = v_{\text{ск}} \left(\frac{(1-\psi)\varphi}{2\psi \sin(\varphi/2)} \right), \quad (8)$$

где ψ – коэффициент сыпучести, для грануляторов барабанного типа $\psi = 0,55 \dots 0,60$.

Угловая скорость барабанного гранулятора

$$\omega = \frac{2v_{\text{под}}}{D}. \quad (9)$$

Заключение. На сегодняшний день процесс получения сложносмешанных НРК-удобрений методом окатывания в барабанном грануляторе мало изучен и имеет слабые стороны. Повышение качества выпускаемой продукции необходимо решать путем улучшения технологического процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоцкая, Н. А. Влияние влагосодержания шихты на качественные характеристики гранул комплексных удобрений / Н. А. Высоцкая, В. С. Францкевич // 85 науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). – Минск: БГТУ, 2021. – С. 70–72.
2. Гранулирование методом откатывания на движущейся поверхности / Н. А. Высоцкая [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 1. – С. 88–94.
3. Классен, П. В. Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – Москва: Химия, 1982. – 272 с.
4. Францкевич, В. С. Гранулирование сложносмешанных удобрений в барабанном грануляторе-сушилке / В. С. Францкевич, Н. А. Высоцкая, А. П. Дворник // Механика. Исследования и инновации: сб. науч. тр. – 2021. – Вып. 14. – С. 226–233.

Контакты:

onti@sipr.by (Высоцкая Надежда Александровна).

N. A. VYSOTSKAYA

FEATURES OF THE FORMATION OF MINERAL FERTILIZER GRANULES IN DRUM UNITS

Abstract

The work discusses granulation by the pelletizing method and its stages. It is noted that important parameters characterizing the formation of granules in the process of granulation by the pelletizing method are; the amount of return, the presence of a liquid phase, temperature and soaking time. The technology for producing granules is presented. The calculation of the main parameters of a drum granulator for the granulation of complex fertilizers is presented.

Keywords:

granulation, drum-granulator, liquid phase, technology.

УДК 621.74

В. П. ГРУША, канд. техн. наук, доц.**А. П. ГУТЕВ****К. Н. БАРАНОВ**

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ ЛИТЬЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АНТИФРИКЦИОННЫХ СИЛУМИНОВ**Аннотация**

Проведена оценка технического уровня и тенденции развития в области производства цилиндрических заготовок из алюминиевых сплавов. Показана принципиальная возможность получения методом непрерывно-циклического литья намораживанием полых цилиндрических заготовок без стержня из антифрикционных силуминов. Определены направления исследований в этой области.

Ключевые слова:

намораживание, литье, полая цилиндрическая заготовка, антифрикционный силумин, свойства, трение.

Особое место среди ответственных деталей для нужд современного машиностроения занимают полые цилиндрические заготовки из антифрикционных сплавов, используемые в основном в качестве подшипников скольжения. Кроме того, заготовки с высокими антифрикционными свойствами типа втулок, вкладышей, полых направляющих и других тел вращения с различными соотношениями высоты и толщины стенки нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Одним из направлений исследований Института технологии металлов НАН Беларуси является получение новых и улучшение свойств уже созданных материалов, в том числе из алюминий-кремниевых сплавов (силуминов) для использования их при изготовлении различных деталей машиностроения взамен бронзовых и других антифрикционных материалов.

Специалистами ИТМ НАН Беларуси разработан и запатентован уникальный относительно легкий и износостойкий алюминий-кремниевый сплав (антифрикционный силумин), с высокими механическими и антифрикционными свойствами, который применяется для замены бронз, латуней, баббитов в узлах трения различных машин и механизмов. Детали из антифрикционного силумина не уступают либо превосходят серийные аналоги из промышленных антифрикционных бронз, при этом они в 2–3 раза дешевле и легче последних. Тому свидетельствуют многочисленные положительные акты и отзывы производственных испытаний деталей из антифрикционного силумина в узлах различного

соединяются со стойкам. В верхней части подкосы шарнирно соединены с мачтами вышки, а в нижней части – с опорами, установленными на основании. Вышка оборудуется маршевыми лестницами от пола буровой до балкона с переходными площадками, которые монтируются в одной из колонн вышки, а от балкона до кронблока – лестницами туннельного типа для обслуживания кронблока. В качестве элемента, поддерживающего вышку в вертикальном положении, в большинстве случаев применяют козлы или поперечную раму (портал). Оттяжки предназначены для поддержания устойчивости буровой вышки и ее надежной фиксации.

В процессе эксплуатации вышки на ее элемент могут действовать различные виды нагрузок, в частности на оттяжки особенно при сильных ветрах. Для обеспечения устойчивости вышки необходимо определение нагрузок, действующих на оттяжки. Расчет нужно производить для вышек как с одной оттяжкой, так и с двумя. Схемы данных вышек представлены на рис. 3.

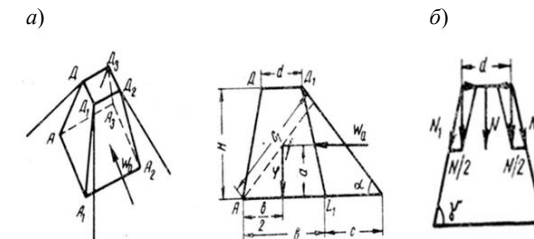


Рис. 3. Схема вышки: а – с одной оттяжкой; б – с двумя оттяжками

Пусть горизонтальная сила $W_0 = P_{вет} + T$ ($P_{вет}$ – усилие от ветровой нагрузки), действующая на плечо a , создает момент $M_0 = W_0 a$ относительно оси AA_3 . Момент устойчивости M_y от веса вышки находится по формуле

$$M_y = P_e \cdot \frac{b}{2}, \quad (1)$$

где b – сторона нижнего основания вышки по осям ног; P_e – вес вышки.

Если значение M_0 получается больше M_y , то оттяжки необходимы. Тогда усилие N в одной стяжке будет определяться по формуле

$$P_{вет} \cdot \frac{b}{2} + N_{c1} = W_0 a K_0, \quad (2)$$

где K_0 – коэффициент безопасности. Принимаем $K_0 = 2$.

Исходя из рис. 3 находим c_1 по формуле

$$c_1 = (b + c) \sin \alpha, \quad (3)$$

где c – расстояние от нижнего основания вышки до оттяжки.

Тогда усилие N находим по формуле

Буровая вышка предназначена для подъема буровой колонны и обсадных труб над скважиной при спуско-подъемных работах и удержания ее на весу во время бурения, размещения буровых труб после извлечения из скважин.

Вышки различают по грузоподъемности (номинальная и максимальная), конструкции (башенного типа и мачтовые), размерам, системе опирания и передаче на фундамент основной нагрузки, степени разборности (разбирающиеся на отдельные детали и секционные) и методу монтажа.

По системе опирания вышки на фундамент их можно подразделить на вышки башенного и мачтового типа. К вышкам башенного типа относятся такие, в которых нагрузка передается на три или четыре опоры. В вышках мачтового типа нагрузка передается на одну или две такие опоры.

Несмотря на то, что башенные вышки имеют такие преимущества, как жесткость их конструкции и меньшая, по сравнению с мачтовыми, стоимость, однако мачтовые вышки имеют больше преимуществ: металлоемкость на 20 % меньше, меньше число разъемных деталей, что ускоряет процесс монтажа и демонтажа, их активно применяют в труднодоступных районах [2]. Поэтому будем рассматривать мачтовую вышку А-образного типа. Данная вышка представлена на рис. 2.

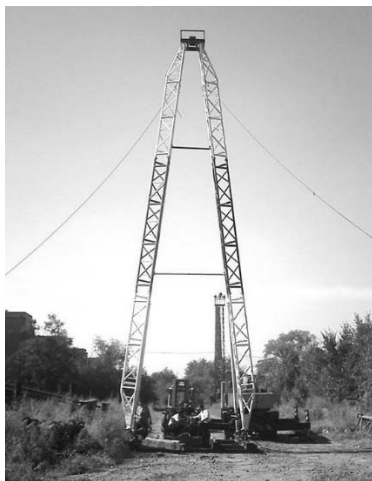


Рис. 2. Мачтовая вышка А-образного типа

Мачтовая вышка А-образного типа состоит из двух ног, соединенных в верхней части. Каждая нога вышки состоит из четырех секций длиной, равной около 10 м. Нижние и верхние секции имеют проушину. Верхняя секция соединяется шарнирно с подкранблочной рамой, которая является связующим звеном мачт вышки в верхней части. Кроме этого, мачты верхней части шарнирно соединяются между собой двумя поясами и двумя парами накрест расположенных винтовых стяжек. В нижней части мачты вышек шарнирно

технологического оборудования. В настоящее время заготовки из антифрикционного силумина внесены в конструкторскую и технологическую документацию на многих предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации.

Для определения целесообразности использования силуминов при изготовлении деталей типа втулки для подшипников скольжения необходимым условием является проведение их триботехнических испытаний, подтверждающих возможность внедрения и использования в производстве результатов исследований. В Санкт-Петербургском институте машиностроения были проведены сравнительные триботехнические испытания образцов из антифрикционного силумина и бронзы БрОЦС5-5-5. Установлено, что при испытании на торцевой машине трения в отсутствие смазки при нормальном напряжении 12,8 Н и вращении со скоростью 620 об/мин коэффициент трения скольжения по стали 45 у образцов из антифрикционного силумина в 1,65 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы. Установлено, что при испытании на машине трения СМЦ-2 со смазкой И20А при нормальном напряжении 200 Н и вращении со скоростью 300 об/мин коэффициент трения по стали 45 образцов из антифрикционного силумина в 1,35 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы. Образцы из антифрикционного силумина испытывали в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси в сравнении с антифрикционными бронзами БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1, БрАЖ9-4 при повышенных удельных нагрузках. Сравнительные триботехнические испытания проводили на машине трения МТВП в условиях смазки (И20А) по схеме возвратно-поступательного перемещения призматического образца по закаленной стали 45 при скорости 0,1...0,5 м/с и нагрузке 10...100 МПа. Было установлено, что антифрикционный силумин по фрикционной износостойкости в условиях высоких удельных нагрузок превосходит промышленные антифрикционные бронзы БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1 и БрАЖ9-4. Результаты триботехнических испытаний в Институте технологии металлов НАН Беларуси на машине трения ИИ5018 показали высокие триботехнические характеристики в смазочной среде образцов из силумина АК12М2 в сравнении с антифрикционными бронзами БрОЦС5-5-5 и БрОЦС4-4-17. Высокие антифрикционные свойства силумина объясняются принципом Шарпи, относительно большой теплопроводностью сплава, высокими дисперсностью, глобулярностью и прочностью кристаллов кремния (β_{Si} -фазы).

В [1–4] установлено, что механические и эксплуатационные свойства заготовок из силуминов во многом зависят от дисперсности их микроструктуры. Наиболее перспективным методом диспергирования микроструктуры силуминов является повышение скорости затвердевания отливки. В результате кристаллы кремния существенно измельчаются и приобретают компактную форму без применения модифицирующих флюсов и лигатур. С целью повышения эксплуатационных и триботехнических свойств силуминов в институте был разработан метод литья закалочным затвердеванием [5], который позволяет

получать сплошные заготовки из силуминов с наноструктурным эвтектическим кремнием и дисперсностью кристаллов первичного кремния до 15 мкм. Данная структура позволяет существенно повысить противозадирные свойства силуминов. Таким образом, силумины с инвертированной и высокодисперсной структурой, полученные в условиях высокой скорости фазового перехода при литье закалочным затвердеванием, являются перспективными материалами для подшипников скольжения [6]. Однако метод литья закалочным затвердеванием не позволяет получать полые цилиндрические заготовки.

Проанализированы литературные данные по основным способам повышения эксплуатационных свойств и условиям формирования полых заготовок из алюминивно-кремниевых сплавов. Авторы работы считают, что по сравнению с центробежным литьем и литьем в кокиль, которые являются наиболее распространенными для получения полых цилиндрических отливок, применение метода непрерывно-циклического литья намораживанием позволяет обеспечить большую производительность труда, высокую технологичность, большие возможности автоматизации и механизации.

Разработанный в Институте технологии металлов НАН Беларуси метод непрерывно-циклического литья, не имеющий аналогов в мировой практике, хорошо зарекомендовал себя при производстве полых цилиндрических отливок из различных типов чугуна, в том числе антифрикционных (АЧС, АЧВ). За это работа по созданию и промышленной реализации принципиально нового метода непрерывно-циклического литья намораживанием высокоизносостойких деталей техники была удостоена Государственной премии Республики Беларусь 2010 г. в области науки и техники.

Преимущества метода, заключающиеся в организации направленного затвердевания металла за счет одностороннего теплоотвода и исключения дефицита жидкой фазы в течение всего времени формирования отливки, в том числе и в момент ее полного затвердевания, способствуют получению высококачественных отливок без дефектов, присущих традиционным способам литья [7]. Кроме того, высокая температура извлекаемых заготовок дает дополнительную возможность для термообработки с использованием первичного тепла.

В настоящее время в институте уже создано и работает уникальное специализированное литейное оборудование, на котором выпускается широкая гамма полых заготовок из чугуна, в том числе и антифрикционного, с различной формой графита, с применением метода направленного затвердевания.

Проведены предварительные эксперименты, в результате которых определена принципиальная возможность получения методом намораживания полых цилиндрических заготовок (рис. 1) из антифрикционного силумина.

Для достижения поставленной цели – повышения физико-механических свойств у деталей машиностроения из антифрикционного силумина за счет управления процессами структурообразования при литье и термической

УДК 622.242.3:624.042.41(045)

В. А. ТРОЙНИЧ

М. Ю. КОДНЯНКО

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (Солигорск, Беларусь)

РАСЧЕТ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОТТЯЖКИ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация

Представлена информация об элементе буровой установки, а именно о буровой вышке. Подробно рассматриваются виды вышек, чем они отличаются, какая из вышек наиболее рационально применима. Был изучен вопрос о действующих видах нагрузок на элементы буровой вышки и способах их расчета для определения усилия воздействия данной нагрузки. В итоге был сделан вывод, что необходимо проводить расчет воздействия нагрузки для ее минимизации.

Ключевые слова:

буровая установка, вышка, устойчивость, нагрузки.

Мобильная буровая установка (МБУ) предназначена для выполнения технологических операций при бурении и освоении скважин, производства ремонтных работ, спуска и подъема насосно-компрессорных и буровых труб, установки эксплуатационного оборудования на устье скважин и ликвидации аварий. Область применения установки – выполнение технологических операций при бурении и освоении скважин, производстве ремонтных работ.

Мобильные буровые установки (рис. 1) разрабатывают и изготавливают в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

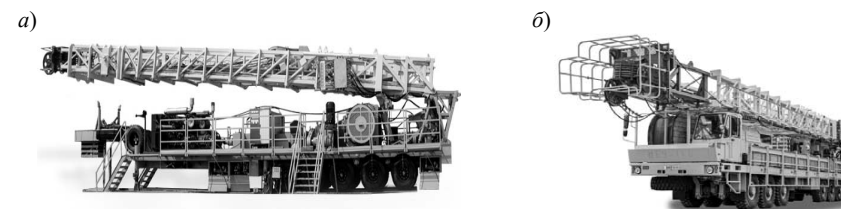


Рис. 1. Мобильная буровая установка производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»: а – МБУ-225; б – МБУ-140

Буровая установка – комплекс бурового оборудования и сооружений, предназначенных для бурения скважин [1]. Бурение скважин представляет собой процесс разрушения горных пород при помощи специальных буровых установок различной мощности и грузоподъемности. Одним из элементов буровой установки является буровая вышка.

Исходя из всех вышеизложенных данных, рассчитав наибольшую силу взаимодействия скобы и конвейерной ленты для двух случаев, по итогу получаем, что в первом случае, когда стыковое соединение эксплуатируется до полной вулканизации клеевого слоя, наибольшая сила взаимодействия скобы и ленты равна 0,0096 Р. Во втором случае, когда начинается эксплуатация соединения только после полной вулканизации клеевого слоя, наибольшая сила равна 0,0066 Р, т. е. в 1,43 раза меньше.

Из этого можно сделать вывод, что применение двух типов соединения концов ленты (клеевого и посредством скоб) приводит к уменьшению наибольшей силы взаимодействия скобы и ленты, способствует выравниванию действующей на ленту нагрузки и тем самым увеличивает прочность многоядерных стыков соединений, что позволяет поддерживать высокую работоспособность ленточных конвейеров, влияющих на уровень технико-экономических показателей предприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mining Wiki – свободная шахтерская энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://miningwiki.ru/wiki/Ленточный_конвейер. – Дата доступа: 29.08.2023.
2. Инструкция по выбору, монтажу и эксплуатации конвейерных лент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293731/4293731208.pdf>. – Дата доступа: 01.09.2023.
3. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко [и др.]; под ред. Г. С. Писаренко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1973. – 696 с.

Контакты:

onti@sipr.by, ipr@sipr.by (Тройнич Виталий Александрович);
gridushko@burgormash.by, onti@sipr.by, ipr@sipr.by (Гридюшко Дмитрий Валерьевич).

V. A. TROINICH, D. V. HRYDZIUSHKA

DECREASE LOADS P-SHAPED SKOB MECHANICAL CONNECTIONS RUBBER-FABRIC TAPES BELT CONVEYORS

Abstract

The article indicates one of the main reasons for the failure of belt conveyors, in particular, due to the uneven distribution of the load tape connections mechanically method using P-shaped skob. Options were considered to reduce the uneven distribution of the load by applying an adhesive layer to the connected ends of the tapes conveyor. As a result, we can conclude that this method leads to a decrease in the greatest force of interaction between the skob and the tape.

Keywords:

belt conveyor, P-shaped skob, belt transport, strength compounds.

обработке, необходимо еще исследовать металлургические параметры процесса и разработать основы непрерывно-циклического литья намораживанием алюминиевых сплавов.



Рис. 1. Полая цилиндрическая отливка из антифрикционного силумина, полученная методом непрерывно-циклического литья намораживанием

Решение поставленных задач позволит получить изделия высокого качества, наладить выпуск конкурентоспособной продукции для различных отраслей промышленности.

Научная новизна проводимых исследований заключается в том, что впервые, за счет целенаправленного воздействия на процессы структурообразования при литье методом намораживания у антифрикционных силуминов будет сформирован новый комплекс повышенных физико-механических свойств и установлены закономерности их формирования.

Таким образом, исследования особенностей формирования и разработка технологии получения заготовок для подшипников скольжения из антифрикционного силумина методом непрерывно-циклического литья носит весьма актуальный характер и является инновационной, обеспечивающей повышение эффективности процесса и улучшение качества продукции, востребованной рынком.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стеценко, В. Ю.** Силумин с глобулярным кремнием / В. Ю. Стеценко, А. П. Гутев, К. Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апр. 2017 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 92–93.
2. **Стеценко, В. Ю.** Использование вибрации струйного кристаллизатора для повышения качества отливок из силуминов / В. Ю. Стеценко, К. Н. Баранов, А. П. Гутев // Литейное производство. – 2020. – № 5. – С. 35–37.
3. **Стеценко, В. Ю.** Модифицирование структуры отливок из силумина с высоким содержанием железа без применения примесных модификаторов / В. Ю. Стеценко, К. Н. Баранов, А. П. Гутев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 148–149.
4. **Гутев, А. П.** Повышение эксплуатационных свойств вторичного силумина АК12М2 / А. П. Гутев, К. Н. Баранов // ЖивКоМ-2022: сб науч. тр. 6 Междунар. науч.-техн. конф. – Москва: ИМАШ РАН, 2022. – С. 110–114.
5. **Марукович, Е. И.** Получение отливок из заэвтектического силумина методом литья закалочным затвердеванием / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2005. – № 2 (34). – С. 142–144.
6. **Стеценко, В. Ю.** Влияние структурной дисперсности и содержания меди на фрикционную износостойкость эвтектического антифрикционного силумина АК15 / В. Ю. Стеценко, А. И. Ривкин, К. Н. Баранов // Литье и металлургия. – 2010. – № 3. – С. 59–61.
7. **Груша, В. П.** Непрерывно-циклическое литье напором полых цилиндрических заготовок червячных колес из серого чугуна / В. П. Груша, А. П. Гутев, К. Н. Баранов // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Сарапул, май 2022 г. – Ижевск: УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 132–137.

Контакты:

grusha@itm.by (Груша Владимир Петрович);
lms@itm.by (Гутев Алексей Петрович);
lms@itm.by (Баранов Константин Николаевич).

U. P. HRUSHA, A. P. GUTEV, K. N. BARANAU

DIRECTIONS OF RESEARCH IN THE FIELD OF CASTING CYLINDRICAL BLANKS FROM ANTI-FRICTION SILUMINS

Abstract

An assessment was made of the technical level and development trends in the production of cylindrical billets from aluminum alloys. The authors have shown the fundamental possibility of producing hollow cylindrical billets without a rod from antifriction silumin using the casting method of continuous-iterative freezing-up. The directions of research in this area have been identified.

Keywords:

freezing, casting, hollow cylindrical blank, anti-friction silumin, properties, friction.

$$C_{\text{эк}} = \frac{C_k C_{nk}}{C_k + C_{nk}}, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \dots, N_p$; C_{nk} – податливость клеевой прослойки, определяемая формулой

$$C_{nk} = \frac{H_{BO} + H_{HO}}{G_p I_k B}, \quad (2)$$

где H_{BO} , H_{HO} – толщина верхней и нижней обкладки ленты соответственно; G_p – модуль сдвига обкладочной резины ленточного конвейера; B – ширина ленточного конвейера.

Значение C_k определяется из ряда выражений [3]:

$$H_1 = H_0 + \frac{H_c}{2}; \quad C_k = \frac{k_g H_1^3}{48 E_c I_k M_k}; \quad I_k = \frac{\pi d_k^4}{32}, \quad (3)$$

где H_0 – толщина ленты ленточного конвейера, $H_0 = 12,5$ мм; H_c – толщина сердечника ленты ленточного конвейера, $H_c = 6,0$ мм; E_c , I_k – модуль упругости и момент инерции поперечного сечения двух ножек П-образной скобы; M_k – число скоб в k -м ряду ленточного конвейера; k_g – коэффициент, учитывающий увеличение податливости скоб за счет контактных деформаций ленты ленточного конвейера.

Остальные параметры ленты типа 2ШТК-100 имеют следующие значения:

$\delta = 4,6 \cdot 10^{-9}$ м/Н; $C = 39,2 \cdot 10^{-9}$ м/Н; $H_{BO} = 4,3$ мм; $H_{HO} = 2,1$ мм; $G_p = 1,7$ МПа; $B = 0,75$ м; $l_k = 21$ мм; $d_k = 2,1$ мм.

Во втором случае будем эксплуатировать транспортную ленту ленточного конвейера только после полной вулканизации клея. При этом вулканизация клея будет происходить при ненагруженном соединении стыка. Тем самым образуется два типа соединения концов ленты (клеевое и посредством скоб), действующие одновременно.

После того как определили $C_{\text{эк}}$ и C_{nk} , определим усилие $X_{\text{эк}}$, воспринимаемое k -упругим элементом с эквивалентной податливостью, которое распределяется между рядом скоб и участком клеевой прослойки следующим образом, указанным в формулах

$$X_k = X_{\text{эк}} / \left(\frac{C_k}{C_{nk}} \right); \quad (4)$$

$$X_{nk} = X_{\text{эк}} / \left(\frac{C_{nk}}{C_k} \right), \quad (5)$$

где X_{nk} – усилие, воспринимаемое k -м участком клеевой прослойки ленточного конвейера.

предназначенных для этого механических соединителей. Как правило, прочность стыков не превышает 60 %...70 % от прочности ленты.

Изготовление стыка при помощи П-образных скоб, когда концы ленты скреплены П-образными скобами, изображено на рис. 1.

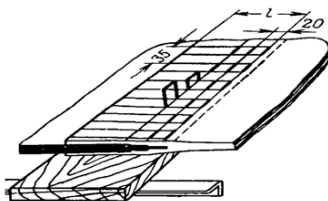


Рис. 1. Скрепление концов ленты П-образными скобами [2]

Скрепление П-образными скобами происходит следующим образом:

- стыкуемые концы конвейерной ленты размещаются на ровном деревянном щите и осуществляется геометрическая разметка стыка;
- лента специальным ножом отрезается под прямым углом;
- концы ленты разделяются в виде ступенчатого клина, а разделанные концы протирают бензином и дважды промазывают клеем;
- в расслоенный конец ленты вкладывают конец другой ленты, а стык тщательно прикатывают и простукивают молотком;
- оба конца скрепляют пробитыми сквозь ленту рядами П-образных скоб, соблюдая расстояние между рядами скоб по длине стыка – 20 мм, между скобами по ширине ленты – 20 мм, между последующим ним рядом скоб и кромкой конца расслоенной ленты – 10 мм (скобы забиваются в ленту так, чтобы они не выступали над поверхностью ленты).

Полученное соединение имеет достаточно высокую прочность, однако она ограничена неравномерностью распределения нагрузки и из-за этого теряется прочность соединения, приводящая к поломкам. Повысить прочность соединений возможно при использовании наклонных скоб за счет уменьшения неравномерности распределения нагрузки.

Рассмотрим влияние нанесения клеевого слоя на распределения усилий между рядами скоб. В первом случае будем эксплуатировать транспортную ленту ленточного конвейера типа 2ШТК-100 сразу же после соединения скобами и не будем дожидаться полной вулканизации клея.

Для начала рассмотрим характер распределения нагрузки между рядами скоб и клеевой прослойкой. Для этого клеевую прослойку разобьем по длине соединения на дискретные участки, примыкающие к рядам скоб. Ряд скоб и примыкающий к нему участок клеевой прослойки промоделируем двумя параллельными упругими элементами. Заменим два элемента одним упругим с эквивалентной податливостью $C_{эк}$, которая находится по формуле

УДК 621.52

А. Н. ЖАРИКОВ

А. Н. ЖИГАЛОВ, *д-р техн. наук, доц.*

М. В. БАШАРИМОВ

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕГЕРМЕТИЧНОСТЕЙ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация

Разработан низкобюджетный метод локализации негерметичностей в вакуумных системах при помощи герметизирующих оболочек, позволяющий фиксировать утечки вакуума как на наружных поверхностях вакуумных систем, так и на внутренних поверхностях водяных рубашек вакуумных печей.

Ключевые слова:

вакуум, вакуумная система, вакуумная печь, поиск утечек, течеискание, негерметичность.

В настоящее время к основным методам течеискания (определения и локализации негерметичности) можно отнести следующие [1]:

– метод контроля давления или же проверка герметичности по натеканию. Сущность данного метода заключается в фиксации зависимости давления от времени при отключенной системе откачки. Достоинством данного метода является отсутствие потребности в дополнительном оборудовании (достаточно штатного вакуумметра, которым, как правило, оснащена любая вакуумная система). Однако локализовать утечку (негерметичность) представляется крайне затруднительным, особенно если вакуумная система предполагает наличие большого количества параллельных ответвлений, которые поочередно выводить из измерительной зоны вакуумметра не представляется возможным. Поэтому данный метод более всего пригоден лишь для фиксации наличия течи;

– ультразвуковой метод предполагает использование ультразвуковых детекторов для обнаружения турбулентных зон в окрестностях утечки, которые порождают акустическое излучение, как правило, с доминирующей ультразвуковой частотой, несмотря на то, что с 2016 г. данный метод стал стремительно развиваться за счет создания устройств, оснащенных «зрением» (камера, фиксирующая изображение от видимого спектра электромагнитного излучения, окруженная множеством чувствительных микрофонов, до 124 шт., сигналы от которых преобразуются и накладываются на изображение, выводимое на экран). Такой ультразвуковой детектор (ультразвуковая акустическая камера) уже позволяет в режиме реального времени визуализировать утечку. Недостатком данного метода все же остается невысокая чувствительность (до 10^{-2} мбар·л/с). Помимо этого, потребность в приобретении дополнительного оборудования, а для ультразвуковой акустической камеры и высокая цена (в эквиваленте золота в мерных слитках 240 г и более), также являются существенными недостатками;

– пузырьковый метод (обмыливание) предполагает создание в вакуумной системе избыточного давления и нанесение мыльного раствора либо иного раствора поверхностно-активного вещества на поверхность вакуумной системы. Появление пузырей в нанесенном растворе свидетельствует об утечке. Несмотря на то, что метод предполагает достаточную чувствительность к утечкам (до 10^{-4} мбар·л/с), он все же может быть ограничен к применению при наличии конструктивных особенностей вакуумных систем, которые не позволяют обозревать место детектирования. Также применение может затруднять наличие поверхностей с покрытием, обладающим гидрофобным эффектом;

– изменение физических свойств остаточного газа в вакуумной системе. Данный метод предполагает внедрение некоторой дозы газа-индикатора в воздух вблизи предполагаемой течи, с предварительным размещением внутри вакуумной системы датчика, который фиксирует появление газа-индикатора. Метод весьма вариативен и может быть реализован посредством контроля изменения теплопроводности, либо сечения ионизации, либо массы остаточного газа (внутри вакуумной системы). Метод имеет высокую чувствительность при поиске утечек и в особенности вариация данного метода с контролем изменения массы (до 10^{-12} мбар·л/с). Несмотря на это, метод имеет существенный недостаток, который обусловлен потребностью в наличии дорогостоящего оборудования, например, стоимость гелиевого течеискателя в эквиваленте золота в мерных слитках приблизительно равна 440 г.

Приняв во внимание все вышеизложенное, возникла потребность в разработке метода, который будет лишен недостатков, присущих рассматриваемым методам. Поэтому директором Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, д-ром техн. наук А. Н. Жигаловым была поставлена задача в разработке низкобюджетного метода локализации негерметичностей в вакуумных системах.

Данная задача была принята к исполнению и в кратчайшие сроки предложено решение, предполагающее освоение метода, основанного на использовании незластичных тонких (5...20 мкм) герметизирующих оболочек, плотность материала которых не превышает 1000 кг/м³. Для этих целей подходят пакеты из ПВД или ПНД, либо их аналоги.

Его суть заключается в накачке (надувании) воздуха внутрь оболочки (пакета), что создает небольшое избыточное давление (близкое к атмосферному) и приводит к ее распрямлению, с последующим креплением посредством клейкой ленты в месте предполагаемой утечки (крепление следует реализовывать таким образом, чтобы очаг предполагаемой утечки оказался внутри герметизирующей оболочки). В некоторых случаях более удобным является первым этапом произвести частичное крепление герметизирующей оболочки, а после надувания произвести окончательное оклеивание. В таком случае удобнее прибегать к использованию насоса или компрессора. Далее при помощи системы откачки создается разрежение внутри вакуумной системы. По истечении интервала времени, приблизительно равному 2 ч, пакет, существенно не изменивший свое состояние (объем воздуха в пакете остается без видимых изменений), сигнализирует об отсутствии значимой негерметичности в данном

УДК 622.647.21:621.867.21.065.3.016(045)

В. А. ТРОЙНИЧ¹

Д. В. ГРИДЮШКО²

¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (Солигорск, Беларусь)

²ООО «Завод Бургормаш» (Солигорск, Беларусь)

УМЕНЬШЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ ЛЕНТ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Аннотация

Указана одна из основных причин выхода из строя ленточных конвейеров, в частности из-за неравномерного распределения нагрузки на соединения ленты механическим способом посредством П-образных скоб. Были рассмотрены варианты уменьшения неравномерного распределения нагрузки посредством нанесения клеевого слоя на соединяемые концы ленты конвейера. По итогу можно сделать вывод, что данный метод приводит к уменьшению наибольшей силы взаимодействия скобы и ленты.

Ключевые слова:

ленточный конвейер, П-образная скоба, транспортная лента, прочность стыков.

Ленточный конвейер – транспортирующее устройство непрерывного действия с объединённым грузонесущим и тяговым органом в виде замкнутой (бесконечной) гибкой ленты [1]. Конвейеры предназначены для транспортирования сыпучих и кусковых материалов насыпной плотностью до 2,4 т/м³, крупность куска – не более 40 мм. В процессе работы конвейер принимает транспортируемый материал от предыдущего ленточного конвейера (или грохота), транспортирует его и перегружает (сгружает) на место складирования (конус). Тяговым и одновременно грузонесущим органом конвейера является закольцованная вокруг концевых барабанов лента. Ленточные конвейеры активно применяют в калийной отрасли, в том числе на предприятии ОАО «Беларуськалий». Из всего парка конвейерных установок около 90 % составляют ленточные конвейеры.

Машины конвейерного транспорта горнодобывающих предприятий страны, а также ближнего и дальнего зарубежья включают в себя огромное количество различных видов ленточных конвейеров, общая протяженность которых достигает несколько километров.

Работоспособность конвейеров является важной составляющей высоких технико-экономических показателей предприятий горнодобывающей промышленности. Поэтому проектирование работы конвейеров необходимо для поддержания высоких технико-экономических показателей предприятия.

Как и любое оборудование, ленточный конвейер в процессе своей работы подвержен различным поломкам. Одна из основных причин выхода из строя – разрушение соединения ленты механическим способом посредством П-образных скоб, при котором соединение происходит с помощью

В ходе выполнения проекта была создана автоматизированная система выбора СОТС, которая позволяет сократить время проектирования технологических процессов. САПР может найти применение на предприятиях, а также в учебном процессе студентов всех форм обучения и специальностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: СОТС: справочник / Л. В. Худобин [и др.]; под общ. ред. Л. В. Худобина. – Москва: Машиностроение, 2006. – 543 с.

2. **Сорокин, С. В.** Модель изнашивания подвижных соединений, работающих в условиях смешанной смазки / С. В. Сорокин // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сб. тр. науч. семинара, посвящ. памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д-ра техн. наук, почётного проф. ДГТУ А. П. Бабичева, Ростов-на-Дону, 28 февр. 2019 г. – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2019. – С. 136–139.

3. **Polsky, E. A.** Technological support of joint reliability indicators taking into account complex formation of surface quality metrics and physical and mechanical properties of functional surface materials / E. A. Polsky, S. V. Sorokin, V. M. Shemenkov // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 31 may 2021 г. – Divnomorskoe, 2021. – P. 052024.

Контакты:

sorokin.tm@mail.ru (Сорокин Сергей Владимирович);

diana-032@yandex.ru (Васильева Диана Евгеньевна);

ims-net80@mail.ru (Игнатова Мария Сергеевна).

S. V. SOROKIN, D. E. VASILYEVA, M. S. IGNATOVA

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR SELECTION OF LUBRICANT AND COOLANT PRODUCTS

Abstract

The automated system is intended for the appointment of lubricating and cooling technological agents. The selection algorithms are based on the analysis of the physicochemical and operational properties of LCs, which determine their influence on the conditions of blade and abrasive processing of machine parts.

Keywords:

lubricating and cooling technological means, automated system, technological support, machine parts quality.

месте, а пакет с явно изменившимся объемом воздуха внутри (стенки пакета сблизившиеся или слипшиеся) сигнализирует о наличии значимой негерметичности. Предполагаемая чувствительность метода при поиске утечек не менее $4,7 \cdot 10^{-3}$ мбар·л/с.

Разработанный метод показал свою эффективность при локализации негерметичностей вакуумной печи на базе Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси.

Предпосылкой для разработки и апробирования данного метода явилась неспособность системы откачки создать внутри вакуумной печи требуемое разрежение (уровень вакуума не достигал значения, заявленного в технической документации на данное оборудование), а при отключении системы откачки наблюдался резкий и постоянный рост давления внутри вакуумной системы, что указывало на наличие утечки.

Для поиска утечки использовались следующие принадлежности: фасовочные ПВД-пакеты (24×37 см, 12 мкм); изоляционная лента ПВХ (изолента); упаковочная клейкая лента (скотч) из полипропилена.

Испытание проводилось на вакуумной системе, которая включает в себя: вакуумную печь с эффективной зоной нагрева $300 \times 300 \times 500$ мм, пластинчатороторный вакуумный насос производительностью 70 л/с, вакуумный насос Рутса производительностью 300 л/с, диффузионный вакуумный насос производительностью 4600 л/с (задействован не был). Вакуумная система рассчитана на предельный вакуум $-6,5 \cdot 10^{-3}$.

После того, как были определены предполагаемые места утечек, эти места были освобождены от электрических проводов и от шлангов теплоносителя, произведен слив воды из водяной рубашки печи для проверки ее внутренней поверхности посредством крепления пакетов на ее штуцера. После закрепления пакетов ко всем намеченным местам (рис. 1) был произведен запуск системы откачки.

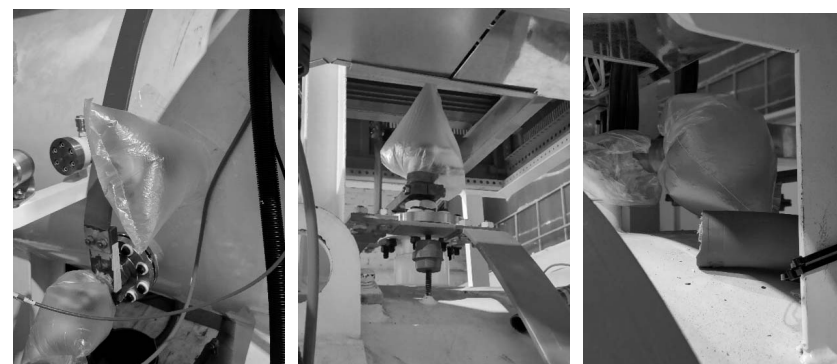
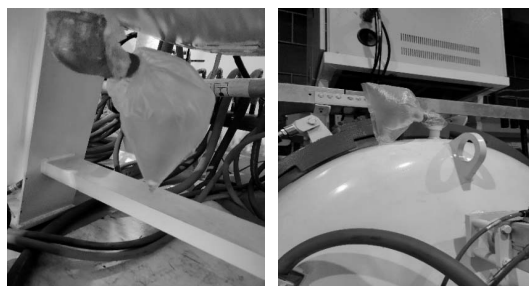
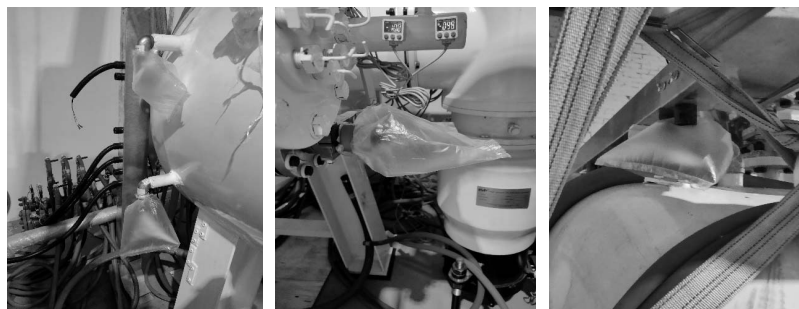


Рис. 1. Примеры крепления герметизирующих оболочек



Окончание рис. 1

В течение 10 мин ($\tau = 10$ мин) в вакуумной системе происходила интенсивная откачка до вакуума с уровнем 5 Па. Далее график изменения давления приобрел вид, приближенный к графику константной функции. После 30 мин работы системы откачки ($\tau = 30$ мин) у одного из пакетов значительно изменился объем внутреннего воздуха, что было заметно визуально (давление 1,7 Па), а по истечении времени $\tau = 45$ мин стенки пакета слиплись (давление 1,4 Па), что явилось собой очевидный маркер наличия негерметичности в данном месте. Динамика изменения объема воздуха внутри герметизирующей оболочки приведена на рис. 2.



Рис. 2. Динамика изменения объема воздуха внутри герметизирующей оболочки

технологической операции. При этом необходимо учитывать совокупность факторов, характеризующих условия обработки, – габариты, форма и конструктивные особенности заготовки, кинематические, динамические и технологические особенности реализации операции, заданные конструктором точностные и качественные параметры результата выполнения операции, форма, размер, конструктивные особенности, материал корпуса и режущей части инструмента, способ подачи СОТС в зону обработки [2, 3].

На основании вышеизложенных материалов было написано программное обеспечение, позволяющее по исходным данным (рис. 1) выбирать СОТС с последующим формированием отчета в виде файла текстового редактора (рис. 2).

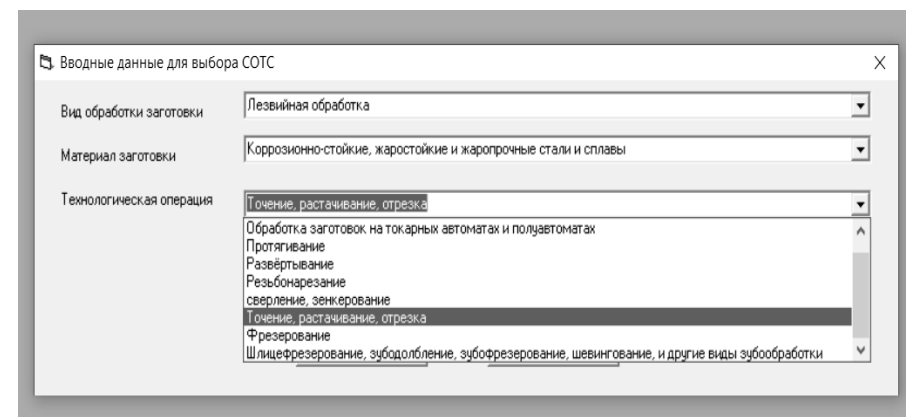


Рис. 1. Рабочее окно программы. Заполнение данных

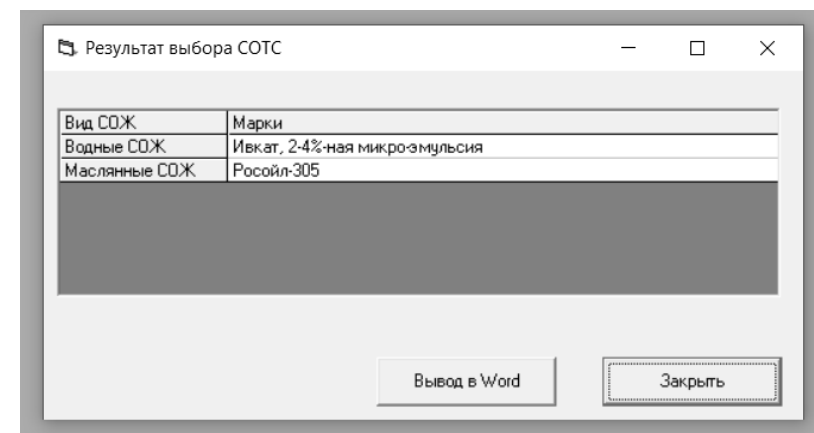


Рис. 2. Результат расчета

СОТС в процессе резания могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на пару «заготовка – инструмент». При выборе конкретной марки СОТС следует ориентироваться на стимулирование положительного эффекта и нивелировать отрицательное воздействие.

Для обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции за счет повышения качества изделий и снижения себестоимости при обработке заготовок применение СОТС обеспечивает следующие аспекты организации производственных процессов:

- существенное увеличение скорости резания и подачи при гарантированном обеспечении заданных показателей качества поверхностей деталей машин, что оказывает максимальное влияние на снижение затрат и повышение производительности труда;

- уменьшение интенсивности изнашивания рабочих поверхностей режущей части инструмента и, как следствие, увеличение периода стойкости инструмента, сокращение его расхода. При этом производственный процесс претерпевает существенную оптимизацию, связанную с сокращением вспомогательного, подготовительно-заключительного времени, а также времени на техническое обслуживание;

- снижение суммарной погрешности обработки функциональных поверхностей деталей машин за счет снижения составляющих, зависящих от температурных деформаций, износа режущей части инструмента, а также уменьшения деформации элементов технологической системы под действием сил резания и нагрева;

- достижение оптимальных показателей значений высотных и шаговых показателей геометрических параметров шероховатости за счет эвакуации из зоны резания высокотвердых частиц, сокращения или полного устранения наростообразования, доставки СОТС в зоны контакта стружки и калибрующих ленточек осевого инструмента с материалом заготовки;

- изменение структуры поверхностного слоя с измененным состоянием в виде снижения наклепа и сжимающих остаточных напряжений, возникающих в зоне контакта инструмента и обрабатываемых деталей;

- улучшение условий стружкообразования и стружкоотвода, снижение температуры заготовки, удаляемой из зоны обработки оператором металлорежущего оборудования;

- повышение параметров экологичности производственных процессов за счет снижения содержания элементов СОТС и продуктов их распада в виде пыли и аэрозолей в рабочих зонах участков обработки;

- уменьшение затрат на очистку СОТС от механических элементов, продуктов обработки, других примесей, на восстановление, утилизацию и захоронение отработанных СОТС и продуктов их разложения.

Рекомендации по выбору марки СОТС сформированы на основе данных разработчиков и изготовителей с учетом результатов лабораторных испытаний профильными научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями [1]. СОТС выбирают в первую очередь исходя из физико-механических свойств материала обрабатываемых заготовок и вида



Окончание рис. 2

Таким образом, пользуясь данным методом, удалось локализовать негерметичность вакуумной системы и в последующем устранить течь при помощи сварки. Это позволило в кратчайшие сроки и практически без затрат вернуть оборудование в эксплуатацию. По всей видимости подавляющее большинство значимых утечек в вакуумных системах можно находить с использованием рассмотренного метода, что позволит экономить большое количество временного и финансового ресурса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клочков, А. В.** Современные методы поиска негерметичностей вакуумных и криогенных систем: методическое пособие к лабораторной работе для бакалавров по направлению «Радиофизика», обучающихся по профилям «Физика магнитных явлений» и «Квантовая радиофизика и квантовая электроника» / А. В. Клочков, М. С. Тагиров. – Казань: ИФ КФУ, 2013. – 24 с.

Контакты:

artyom_zhan@mail.ru (Жариков Артем Николаевич);

jigalov6@mail.ru (Жигалов Анатолий Николаевич);

basharimovfilm@gmail.com (Башаримов Максим Владимирович).

A. N. ZHARIKAU, A. N. JIGALOV, M. V. BASHARIMOV

METHOD OF LOCALIZATION OF LEAKS IN VACUUM SYSTEMS

Abstract

A low-cost method for localization of leaks in vacuum systems is developed, which allows to detect vacuum leaks both on the external surfaces of vacuum systems and on the internal surfaces of water jackets of vacuum furnaces.

Keywords:

vacuum, vacuum system, vacuum furnace, leak detection, leak testing, leakage.

УДК 681.5

В. А. ЗАРЕЦКИЙ**Г. И. ГУЛЬКОВ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**Аннотация**

Смоделирована система управления электропривода мобильного робота на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Проведена проверка адекватности модели и сравнение результатов моделирования с результатами, полученными на прототипе.

Ключевые слова:

мобильный робот, СДПМ, система управления электроприводом, дифференциальный привод, моделирование электропривода, MATLAB.

Начиная с 2011 г. получает все большее распространение так называемая четвертая промышленная революция. Она заключается в интеграции кибер-физических систем в производственные процессы. Это заключается в полностью автоматическом функционировании, прогнозировании и регулировании технологического процесса. Автоматические тележки и мобильные роботы являются неотъемлемой частью данного преобразования привычного производства. Мобильные роботы могут перевозить как грузы, так и оборудование, например роботов-манипуляторов. В концепции четвертой промышленной революции производственные модули взаимодействуют друг с другом посредством интернета вещей. Таким образом, участие человека в производственном процессе сводится к минимуму.

Существует несколько вариантов того, как привести автоматизированную тележку в движение:

- применение двух приводных колес и одного или двух поворотных колес. Такая система применяется во всех автомобилях;
- применение всенаправленных колес, так называемых омни- и меканумвиллов [1]. Данная система позволяет обеспечить движение тележки во всех направлениях, не изменяя угол поворота тележки в пространстве. Данная система успешно применяется компанией Кука в автоматизированных тележках грузоподъемностью от 50 т, используемых в самолетостроении компании Airbus;
- применение дифференциального привода. Является на сегодняшний день одной из самых распространенных систем приведения тележек в движение [2].

Исследование будет проводиться для электропривода, работающего в системе дифференциального привода транспортной тележки.

Имитационное моделирование исследуемой системы электропривода (рис. 1 и 2) будет проводиться для режима, который будет применен при экспериментальном исследовании. Данный режим представляет собой разгон тележки до скорости 1 м/с, движение с этой скоростью и торможение до нуля и

УДК 004.414

С. В. СОРОКИН, канд. техн. наук, доц.**Д. Е. ВАСИЛЬЕВА****М. С. ИГНАТОВА**

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**Аннотация**

Автоматизированная система предназначена для назначения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Алгоритмы выбора основаны на анализе физико-химических и эксплуатационных свойств СОТС, определяющих их влияние на условия лезвийной и абразивной обработки деталей машин.

Ключевые слова:

смазочно-охлаждающие технологические средства, автоматизированная система, технологическое обеспечение, качество деталей машин.

Обработка заготовок резанием остается основным методом формообразования деталей машин. В процессе резания металлов наблюдаются значительные относительные деформации материалов обрабатываемых изделий и инструмента, а также трение заготовки и инструмента по задней поверхности и удаляемой стружки по передней поверхности. Увеличение нормальной составляющей нагрузки P_H приводит к пропорциональному росту фактической площади контакта F_ϕ , вызванному пластическими деформациями микронеровностей поверхностного слоя заготовки, как тела пары трения с меньшей твердостью:

$$F_\phi = \frac{P_H}{\sigma_T}, \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести материала заготовки.

В процессе «сухого» трения силы, возникающие в зоне резания, есть сумма всех тангенциальных сил сопротивления сдвигу при пластической деформации поверхностных слоев и пластической деформации выступов в пятнах контакта, сил сопротивления скалыванию для материалов, склонных к хрупкому разрушению, а также сил адгезии контактирующих материалов. Попадание СОТС в зону контакта приводит к значительному уменьшению адгезионного взаимодействия, что приводит к снижению теплообразования и износа трущихся поверхностей. Из формулы (1) становится ясно, что значение нагрузки P_H , необходимое для достижения зоны пластических деформаций, существенно зависит от СОТС, применяемого в зоне резания, и температуры, т. к. именно эти два компонента оказывают влияние на значение предела текучести σ_T .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довгалец, А. М. Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 10–15.
2. Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали: пат. ВУ 17976 / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа. – Опубл. 28.02.2014.
3. Довгалец, А. М. Влияние технологических и конструктивных параметров процесса магнитно-динамического раскатывания на шероховатость поверхности / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 21–25.
4. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом: монография / В. М. Шеменков [и др.]; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с. : ил.
5. Свирепа, Д. М. Актуальность комплексной обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом / Д. М. Свирепа, В. М. Шеменков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 74.
6. Свирепа, Д. М. Модифицирование поверхностного слоя комплексным магнитно-силовым и низкоэнергетическим воздействием / Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 69.
7. Свирепа, Д. М. Влияние обработки тлеющим разрядом на качественные характеристики внутренних цилиндрических поверхностей / Д. М. Свирепа, В. М. Шеменков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 65.
8. Способ упрочнения поверхности цилиндрического отверстия в металлической детали: пат. ВУ 23750 / В. М. Шеменков, Д. М. Свирепа, М. А. Рабыко, А. М. Довгалец, В. В. Шеменков, А. Н. Елисеева, А. С. Кручинина. – Опубл. 30.06.2022.

Контакты:
svdima@tut.by (Свирепа Дмитрий Михайлович).

D. M. SVIREPA

INFLUENCE OF TREATMENT BY MAGNETIC-DYNAMIC ROLLING AND GLOW DISCHARGE ON THE ROUGHNESS OF INNER CYLINDRICAL SURFACES

Abstract

Research has been carried out on the dependence of the roughness parameter Ra on the rotation speed and feed of a magnetic-dynamic sheeting machine. The hardness of the surface after treatment with a glow discharge, as well as the effect of a glow discharge on the roughness of the treated surface, were studied.

Keywords:

surface plastic deformation, modification of the surface layer, magnetic-dynamic rolling, low-energy impact, glow discharge.

движение тележки в обратную сторону с пониженной скоростью. В имитационной модели также учтены масса тележки и масса груза – 130 и 110 кг соответственно.

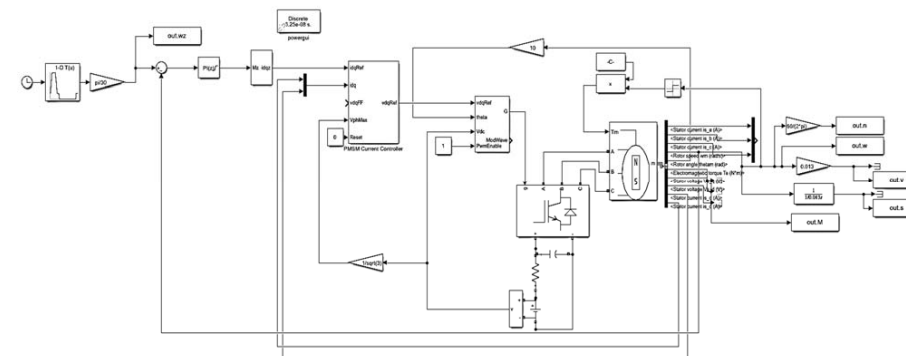


Рис. 1. Имитационная модель дискретной САУ СДПМ с учетом преобразования координат

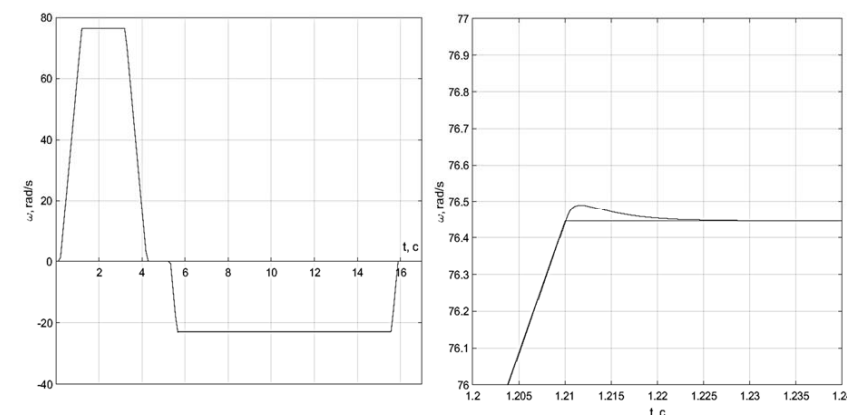


Рис. 2. Зависимость угловых скоростей двигателя $\omega = f(t)$ и $\omega_3 = f(t)$

В качестве экспериментального стенда выступает действующая транспортная тележка. Транспортная тележка оснащена покупным контроллером моторов, программа которого работает в соответствии с моделью.

Функциональная схема экспериментального стенда представлена на рис. 3.

На рис. 3 введены следующие обозначения: AGV Main board – главная плата автоматизированной тележки, которая осуществляет управление всеми системами тележки; MCU – микроконтроллер TMS320F28335, в программе которого реализовано векторное управление двумя двигателями дифференциального

привода транспортной тележки; Др – драйверы трехфазных транзисторных мостов; АИН – автономный инвертор напряжения; BMS – система управления батареей тележки; АКБ – аккумуляторная батарея транспортной тележки.

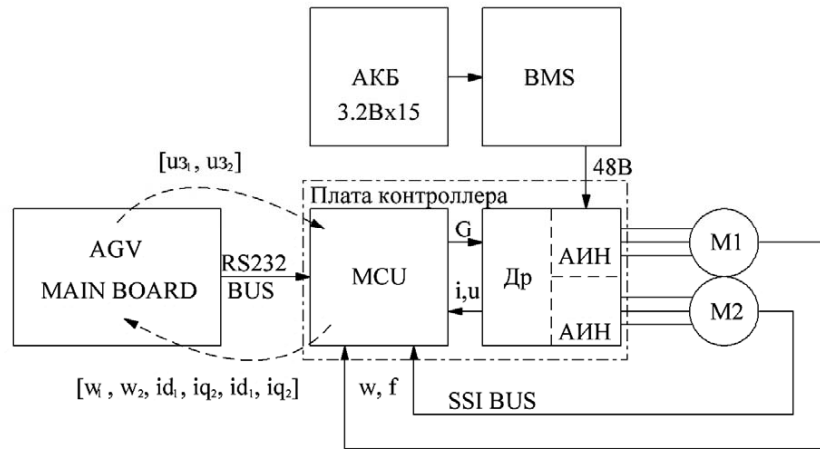


Рис. 3. Функциональная схема экспериментального стенда

Принцип работы экспериментального стенда: программа управления автоматизированной тележкой формирует задание на вращение каждого из колес дифференциального привода для обеспечения прямолинейного движения тележки. Система автоматического управления, реализованная в программе микроконтроллера, преобразует задание в сигналы управления ключами трехфазного АИН в соответствии с реализуемым векторным управлением с учетом обратных связей по току (от датчиков на основе элемента Холла) и положения ротора (от энкодера мотор-колеса по шине SSI).

Запись результатов эксперимента производится с частотой 10 Гц, логирование производится для значений скорости и токов в осях $d-q$.

Алгоритм проведения эксперимента представляет собой разгон тележки с грузом до номинальной скорости и последующее торможение (рис. 4). Масса тележки порядка 150 кг, масса груза порядка 110 кг, разгон осуществляется до скорости 1 м/с.

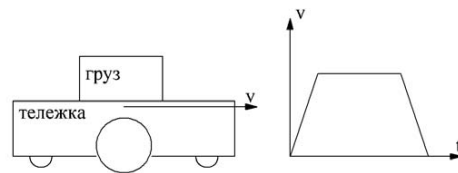


Рис. 4. Алгоритм проведения эксперимента

В результате выполнения исследований на основании дюрометрического анализа, по методу Виккерса, образцов из стали 20ХГ после термической обработки и обработанных тлеющим разрядом с различными частотами горения установлено, что твердость образцов в состоянии поставки составляет 3800...3950 МПа.

Установлено, что обработка образцов тлеющим разрядом приводит к повышению твердости поверхности на 3 %...5 % (до 3990...4070 МПа).

Максимальное значение приращения твердости наблюдается при обработке тлеющим разрядом напряжением 2500 В и плотностью тока 0,250 А/м² в течение 30 мин.

Для оценки влияния тлеющего разряда на морфологию упрочняемых поверхностей было проведено исследование шероховатости.

Таким образом, после классической токарной обработки шероховатость поверхности составляет $R_z = 20,948 \mu\text{m}$ (рис. 4).

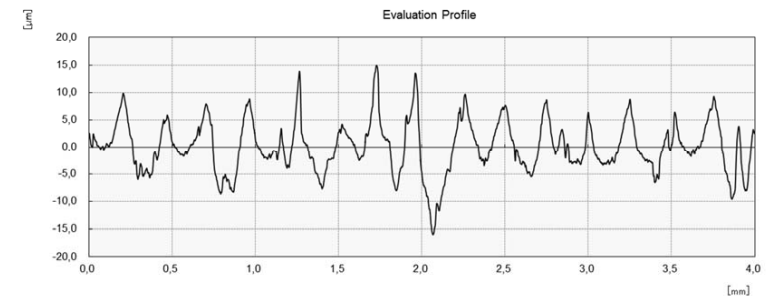


Рис. 4. Результаты измерения шероховатости поверхности, обработанной резцом

Обработка тлеющим разрядом приводит к незначительному уменьшению величины микронеровностей до значения $R_z = 20,849 \mu\text{m}$, что может быть связано с распылением поверхности ионным потоком (рис. 5).

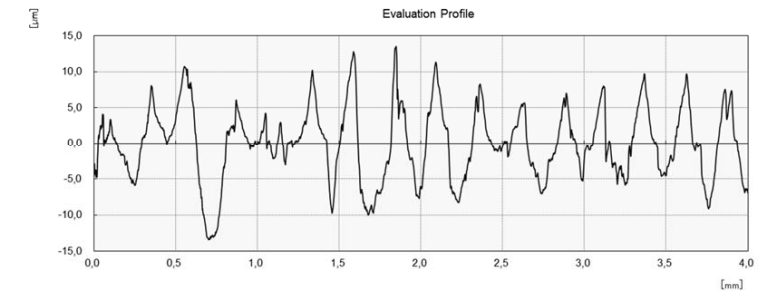


Рис. 5. Результаты измерения шероховатости поверхности после обработки тлеющим разрядом

Последующие исследования позволяют установить влияние комплексной обработки магнитно-динамическим раскатыванием и тлеющим разрядом на качественные характеристики внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин.

- количество магнитов для разгона деформирующих элементов – 28;
- количество магнитов для намагничивания заготовки – 44.

Установлена зависимость скорости вращения инструмента при магнитно-динамическом раскатывании на параметр шероховатости Ra . При обработке деталей из стали 20ХГ (180...200 НВ) со скоростями 558...1098 м/мин обеспечивается снижение шероховатости с Ra 5,3...6,8 мкм до Ra 0,76...1,65 мкм (рис. 2).

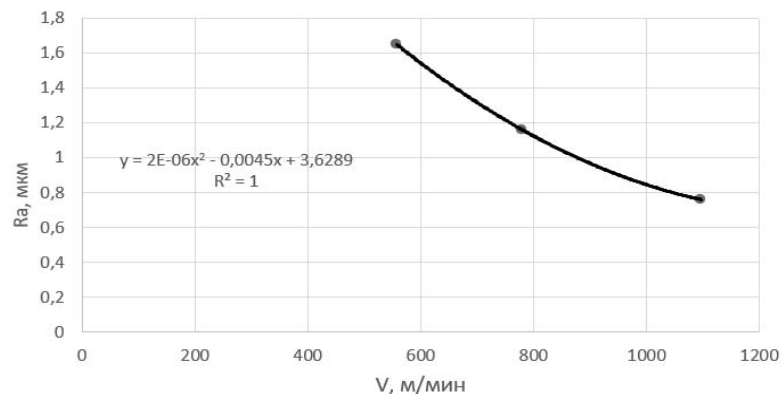


Рис. 2. Зависимость параметра шероховатости Ra от скорости вращения инструмента

Установлена зависимость подачи инструмента при магнитно-динамическом раскатывании на параметр шероховатости Ra . При обработке деталей из стали 20ХГ (180...200 НВ) с подачей 20...200 м/мин обеспечивается снижение шероховатости с Ra 5,3...6,8 мкм до Ra 0,76...1,3 мкм (рис. 3).

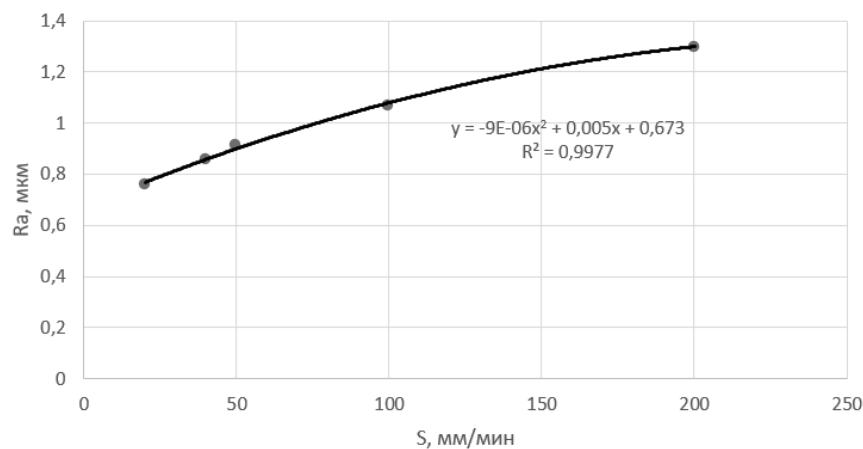


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости Ra от подачи инструмента

Интерес представляет сравнение результатов имитационного моделирования с полученными результатами эксперимента. Наложенные графики, полученные при имитационном моделировании, и экспериментальные представлены на рис. 5–8. Обозначение ex и mod означают экспериментальные и смоделированные.

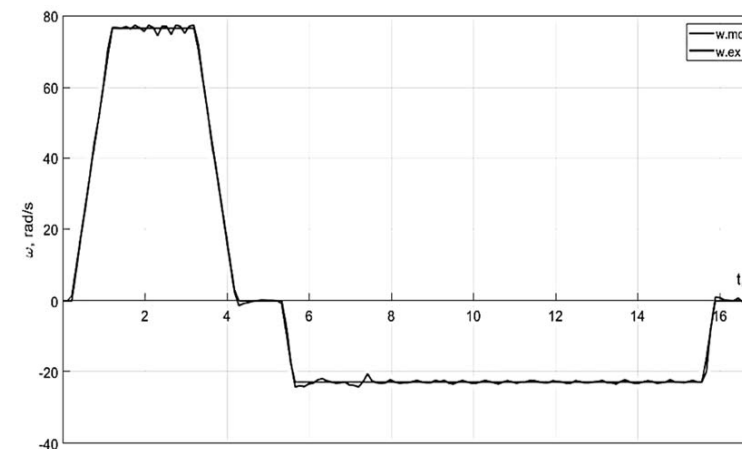


Рис. 5. Зависимости $\omega = f(t)$ и $\omega_3 = f(t)$

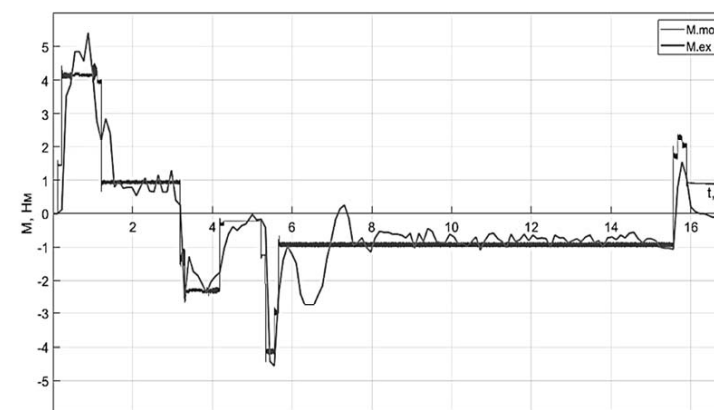


Рис. 6. Момент на валу двигателя $M = f(t)$

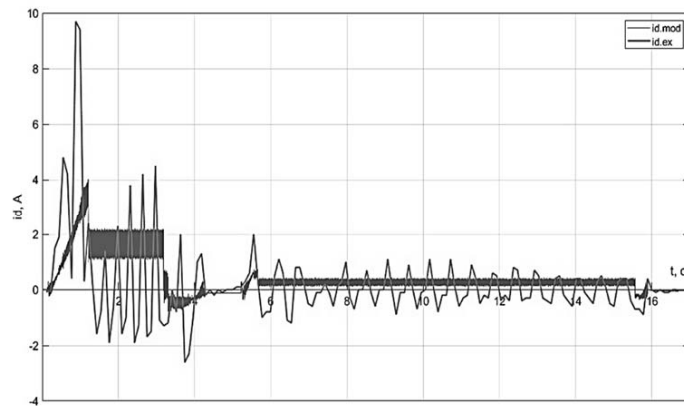


Рис. 7. Ток двигателя $i_d = f(t)$ по оси d

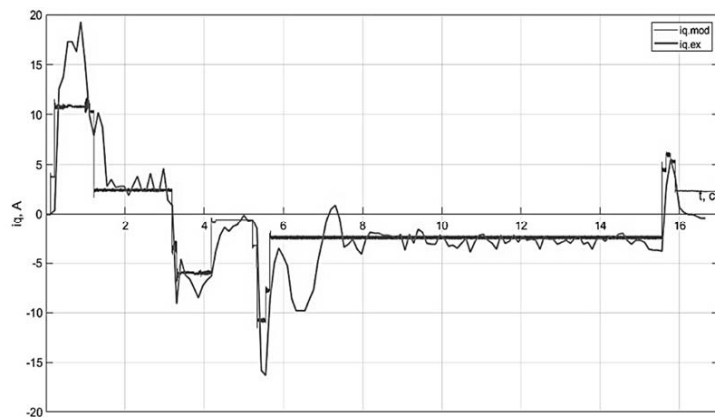


Рис. 8. Ток двигателя $i_q = f(t)$ по оси q

Как видно из графиков, полученных при моделировании, а также графиков, полученных при проведении экспериментального испытания, имитационная модель соответствует реальному устройству, реализованному с использованием рассчитанных коэффициентов регуляторов.

Важно отметить, что в реальной системе присутствуют колебания выходной величины – скорости вращения вала двигателя, в то время как в имитационной модели эти колебания отсутствуют. Это обусловлено тем, что при расчетах регуляторов присутствует ряд допущений, не учтено несовершенство настройки фильтров, также не учтены случайные события, инерционность реальной

УДК 621:787

Д. М. СВИРЕПА, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ РАСКАТЫВАНИЕМ И ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация

Проведены исследования зависимости параметра шероховатости Ra от скорости вращения и подачи магнитно-динамического раскатника. Исследована твердость поверхности после обработки тлеющим разрядом, а также влияние тлеющего разряда на шероховатость обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова:

поверхностное пластическое деформирование, модифицирование поверхностного слоя, магнитно-динамическое раскатывание, низкоэнергетическое воздействие, тлеющий разряд.

В Белорусско-Российском университете разработаны два метода модифицирования поверхностного слоя деталей машин: магнитно-динамическое раскатывание и низкоэнергетическое воздействие тлеющим разрядом. Эти два метода хорошо зарекомендовали себя на производстве и возникла идея рассмотреть их комплексное влияние на внутреннюю цилиндрическую поверхность деталей машин [1–4].

Намечено проведение научных исследований комплексного влияния магнитно-динамическим раскатыванием и низкоэнергетическим воздействием тлеющим разрядом на внутреннюю цилиндрическую поверхность деталей. С этой целью был разработан и изготовлен магнитно-динамический раскатник (рис. 1) [5–8]. Магнитно-динамический раскатник снабжен двумя магнитными системами. Одна из них предназначена для разгона деформирующих шаров с целью поверхностно-пластического деформирования обрабатываемой поверхности, а другая – для предварительного (до начала ППД) и окончательного (после ППД) высокочастотного воздействия магнитным полем на поверхность обрабатываемой заготовки.

Параметры магнитно-динамического раскатника:

- деформирующие шары Ø12 из ШХ 15, твердостью 62...65 HRC;
- количество деформирующих шаров – 25;
- материал цилиндрических постоянных магнитов – Nd-Fe-B;
- размеры цилиндрических постоянных магнитов (D x l), мм, – 9 x 10;



Рис. 1. Магнитно-динамический раскатник

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shumyacher, V. M.** Monitoring of grinding process with help of automatic measuring complex / V. M. Shumyacher, A. V. Slavin, P. I. Bochkarev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2019.
2. **Евсеев, Д. Г.** Модели шлифования: теория и эксперимент / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Москва : Известия, 2018. – 311 с.
3. **Shumyacher, V. M.** Monitoring operating parameters of abrasive materials / V. M. Shumyacher, S. A. Krukov, N. V. Baydakova // Procedia Engineering 206, 2017. – P. 232–235.
4. **Krukov, S. A.** Determining the Volume-size Pore Space Parameters in the Grinding Wheels Mechanical Engineering and Computer Science / S. A. Krukov, N. V. Baydakova, V. M. Shumyacher // Mechanical Engineering and Computer Science 5. – 2018. – P. 1–8.
5. **Пушкарев, О. И.** Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер. – Волгоград: Альянс Югполиграфиздат, 2004. – 142 с.
6. **Пушкарев, О. И.** Контроль качества шлифовальных материалов по прочностным характеристикам их зерен / О. И. Пушкарев, В. А. Назаренко, А. В. Гончарова // СТИН. – 2009. – № 7. – С. 26–29.
7. **Пушкарев, О. И.** Мониторинг физико-механических и эксплуатационных характеристик шлифматериалов / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер // СТИН. – 2006. – № 10. – С. 24–27.
8. **Shumyacher, V. M.** Express control of abrasive tool operational characteristics / V. M. Shumyacher, S. A. Kryukov, O. G. Kulik // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2020.
9. **Shumyacher, V. M.** On the mechanism of interaction of abrasive tools and a workpiece at grinding / V. M. Shumyacher, A. V. Slavin, B. M. Brzhozowski // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2016. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2016.

Контакты:

artem-savchic@yandex.ru (Савчиц Артем Вячеславович);
vms22@yandex.ru (Шумячер Вячеслав Михайлович).

A. V. SAVCHITS, V. M. SHUMYACHER

EVALUATION OF THE PROPERTIES OF ABRASIVE MATERIAL AND TOOL USING A COMPLEX OF AUTOMATED DEVICES

Abstract

In the manufacture of abrasive tools, there is a fairly high percentage of defects. This is mainly due to the fact that the tool manufacturing process does not take into account the initial properties of abrasive materials, which leads to disruption of the entire technological chain. As a way out of this situation, this paper proposes the development of an automated information-measuring system. The basis of the system is a set of measuring instruments that allow at an early stage to assess the properties of abrasive materials and adjust the formulation to achieve the best performance. The system also includes equipment for evaluating the basic properties of finished abrasive tools, which allows you to store data in a database and quickly track and correct any inaccuracies in the recipe. Such a system will make it possible to control the entire process of manufacturing an abrasive tool, which will lead to a reduction in rejects and an increase in the quality of the abrasive tool.

Keywords:

abrasive materials, grinding grain, abrasive tool, grain destructibility, cutting ability, information-measuring system, measuring device.

системы (так сцепление колес с полом не является постоянным и изменяется в зависимости от дефектов покрытия), инерционность подвески колес дифференциального привода тележки, момент инерции тележки при повороте вокруг вертикальной оси и пр.

Решением данной проблемы системы автоматического управления может быть индивидуальная юстировка коэффициентов регуляторов для каждой конкретной тележки и для каждого конкретного двигателя, что при серийном производстве негативно скажется на трудоемкости производства одной единицы продукции.

Также решением может быть синтез системы автоматического управления положением тележки с учетом математической модели дифференциального привода и системы автоматического управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Данный вопрос изучен мало и в коммерческих решениях применяется табличный вариант управления скоростью и поворотом тележки, т. е. задается таблица соответствий скоростей колес заданной скорости и повороту тележки, система по-прежнему остается двухконтурной для каждого двигателя [3].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Adriane Turner.** Evaluation of Automated Storage and Retrieval in a Distribution Center / Adriane Turner // B. S. Chemical Engineering, University of California Santa Barbara, 2014. – 54 p.
2. Sanchez S.; Bhounsule, P. A. Design, Modeling, and Control of a Differential Drive Rimless Wheel That Can Move Straight and Turn. Automation 2021, 2, 98–115.
3. Advanced Brushed and Brushless Digital Motor Controllers [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.roboteq.com/docman-list/motor-controllers-documents-and-files/documentation/user-manual/272-roboteq-controllers-user-manual-v21/file>. – Data of access: 15.08.2023.

Контакты:

strcartun@gmail.com (Зарецкий Владимир Александрович);
Ggulkov@bntu.by, G.gulkov@yandex.ru (Гульков Геннадий Игнатьевич).

U. A. ZARETSKI, G. I. GULKOW

MODELING OF THE ELECTRIC DRIVE FOR MOBILE ROBOT MOTION

Abstract

A control system for the electric drive of a mobile robot based on synchronous motors with permanent magnets has been modeled. The adequacy of the model was verified, and the results of the modeling were compared with the results obtained on the prototype.

Keywords:

mobile robot, SMPM, electric drive control system, differential drive, electric drive modeling, MATLAB.

УДК 621.75

*Е. В. ИЛЬЮШИНА, канд. техн. наук, доц.**Н. М. ЮШКЕВИЧ*

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПНЕВМОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**Аннотация**

Приведены исследования упрочняющей пневмоударной обработки плоских стальных заготовок, используемых для изготовления накладных направляющих станин станков. Получены экспериментальные зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи, а также проведен анализ параметров шероховатости.

Ключевые слова:

упрочняющая пневмоударная обработка, шероховатость поверхности, наклеп, износ, направляющие.

Введение. Использование методов пневмовибродинамической обработки для упрочнения плоских поверхностей из чугуна и алюминиевых сплавов показало свою эффективность, имеются хорошие наработки в области упрочнения, например, чугунных направляющих станин металлорежущих станков [1]. Однако данный опыт можно использовать и для исследования обработки стальных направляющих, которые чаще всего в станкостроительном производстве изготавливают накладными. К чугунным станинам их крепят механическим способом или приклеивают, а к стальным – приваривают. Материалами для накладных направляющих служат цементированные и закаленные малоуглеродистые стали, азотированные стали, а также высокоуглеродистые хромистые закаленные стали твердостью HRC 58...62 (например, стали 20X, 18XГТ, 12ХН3А, ШХ15, ШХ15СГ, ХВГ, 7ХГ2В, 8ХФ, 38ХМЮА, 40ХФ, 30ХН2МА и др.) [2].

При этом к направляющим скольжения металлорежущих станков предъявляются высокие требования по точности, жесткости, износостойкости и шероховатости поверхности. Числовое значение параметра шероховатости поверхности стальных направляющих зависит от массы станка и его класса точности, для станков нормальной точности массой от 1 до 10 т значение шероховатости Ra не должно превышать 1,25 мкм в соответствии с ГОСТ 7599–82.

Работа направляющих происходит в режимах граничного, жидкостного и смешанного трения с использованием различных смазочных материалов, которые снижают нагрузку на направляющие, увеличивают скорость скольжения и снижают коэффициент трения. Условия работы направляющих скольжения значительно улучшаются при гидродинамическом режиме трения, когда на поверхности постоянно присутствует смазка, для которой предусмотрены смазочные канавки. Пневмовибродинамическая обработка позволяет, упрочняя поверхность, наносить на поверхностный слой сетку мелких лунок, которые

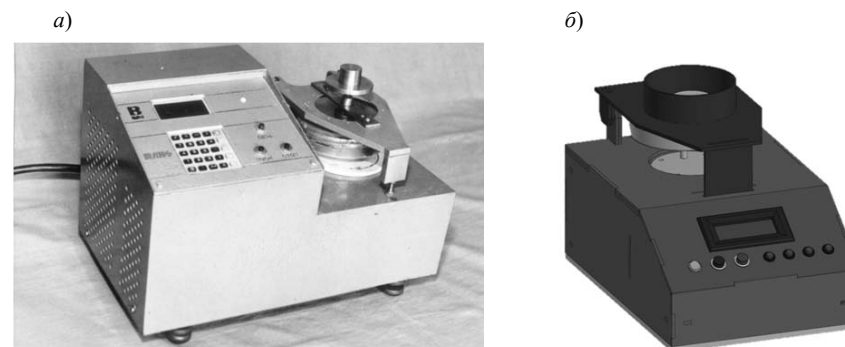


Рис. 2. Структурная схема информационно-измерительной системы

Ключевой особенностью модернизированного прибора стала возможность изменения, в широком диапазоне, скорости и времени вращения контртела. Прибор старого образца такой возможностью не обладал. Модернизация позволила снизить массогабаритные показатели прибора и потребляемую мощность.

Табл. 1. Сравнительная характеристика приборов ШЛИФ старого и нового образца [5–7]

Характеристика	ШЛИФ-2 (старого образца)	ШЛИФ-3 (модернизированный)
Частота вращения контртела, об/мин	59	1...120
Диаметр контртела, мм	110	110
Диаметр испытательного образца, мм	10...50	10...50
Потребляемая мощность прибором, кВт	0,12	0,07
Габаритные размеры, мм	400 × 235 × 320	360 × 240 × 240
Масса, кг	21	5

Модернизированной прибор позволяет выводить на встроенном дисплее или передавать по сети Wi-Fi информацию об эффективности шлифования при использовании различных абразивных материалов. Расчет данного показателя осуществляется на основе потребляемой мощности прибора при работе с разными материалами [8, 9].

Применение приборов для оценки свойств абразивных материалов и инструмента, а также информационно-измерительной системы позволит значительно снизить брак при производстве абразивного инструмента и трудозатраты. Сбор данных с такой системы позволит совершенствовать технологию изготовления, постоянно улучшая качественные показатели производимого абразивного инструмента.

основных показателей. Данные параметры позволят непосредственно оценить необходимые величины (например, вес образца и его размер) или косвенным путем определить расчетные параметры, характеризующие качественные показатели (например, удельную энергию шлифования).

Полученные данные, после анализа приборами, будут отображаться на самом приборе или передаваться по промышленным сетям (проводной или беспроводной) на компьютер, планшет или смартфон. Такой подход дает возможность организовывать информационно-измерительную сеть из приборов, тем самым позволяя производить оперативный анализ полученных результатов, формировать отчеты и корректировать рецептуру производимого абразивного инструмента. Пример структурной схемы информационно-измерительной системы представлен на рис. 1.

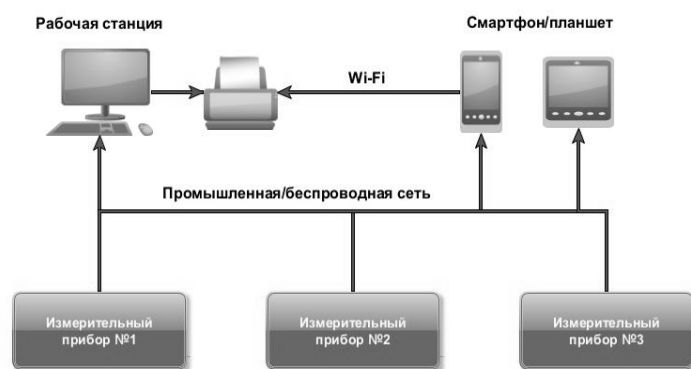


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной системы

Система будет работать следующим образом: оператор загружает необходимые образцы, например абразивное зерно или связку, в измерительный прибор и запускает его в работу. После анализа прибор передает информацию по проводному или беспроводному интерфейсу в персональный компьютер, планшет или смартфон. В специально разработанном приложении выводится вся необходимая информация о проведенном анализе, а также автоматически корректируется рецептура изготовления абразивного инструмента. При проведении анализа свойств готового абразивного инструмента будет формироваться отчет о его годности или браке партии. На данный момент готовый абразивный инструмент пока что анализируется только на твердость и соответствие его данной группе. Результаты могут быть отправлены на печать.

В настоящее время проведена модернизация прибора ШЛИФ. На рис. 2 представлен вид прибора до (а) и после (б) модернизации. Основные технические характеристики приборов приведены в табл. 1.

оставляют шары при ударах о заготовку. В этих «микрорезервуарах» задерживается смазка, возобновляясь при каждом поступательном движении двух трущихся поверхностей. Маслосмкость обработанной пневмоударами поверхности увеличивается в сравнении со шлифованными, шабреными, фрезерованными и полированными поверхностями [3].

Одной из проблем при работе направляющих скольжения является их высокая интенсивность изнашивания, связанная не только с условиями трения, но и с загрязнением направляющих частицами абразивных материалов, попадающих из рабочей зоны станка (стружка, окалина, песок и т. д.). При этом известно, что износ направляющих по длине происходит неравномерно, следовательно использование накладных направляющих в данном случае позволяет легко осуществить их замену после выхода из строя, что гораздо проще, чем осуществлять ремонт, например чугунных направляющих. Повышению износостойкости направляющих способствует упрочнение их поверхностного слоя. Исследования в области ремонта чугунных направляющих пневмовибродинамической обработкой показали преимущества данной технологии над процессами шлифования и тонкого фрезерования, при этом износостойкость станин повысилась в 1,5–2 раза, срок службы станка увеличился в 1,6 раза, а трудоемкость технологии ремонта снизилась в сравнении с существующими способами в 2 раза [4].

Целью работы является проведение экспериментальных исследований упрочняющей пневмоударной обработки плоских поверхностей стальных заготовок для нахождения в первом приближении режимов процесса и установления зависимостей шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки.

Исследование упрочняющей пневмоударной обработки плоских стальных поверхностей. Для проведения экспериментальных исследований использовали уже имеющуюся конструкцию инструмента для пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей [5]. Данная конструкция хорошо себя зарекомендовала при обработке заготовок из чугуна и алюминиевых сплавов (рис. 1). Технология обработки сводится к упрочнению поверхности стальной заготовки деформирующими шарами 7 (материал – сталь ШХ15, твердостью HRC 62...65), которые приводятся в движение шарами 6 большего диаметра и массы.

Исследования проводились в условиях лаборатории Белорусско-Российского университета. Оборудование – универсальный фрезерный станок модели JUM-1464, компрессорная станция BK25T-8-500Д. Для измерения параметров шероховатости использовался профилометр SJ-210 Mitutoyo.

Исследования проводились на образцах из стали 8ХФ ГОСТ 5950–2000, которая используется для изготовления накладных направляющих, при этом она является в 2 раза дешевле в сравнении со сталью 12ХН3А. Размеры образцов заготовок – длина 500 мм, ширина 90 мм, высота 25 мм. Исходная поверхность заготовок предварительно обработана шлифованием с СОЖ ($Ra_{исх} = 0,180...0,240$ мкм), твердость 250...260 НВ. Параметры шероховатости исходной поверхности стальных заготовок представлены в табл. 1.

Экспериментальные исследования проводились при давлении сжатого воздуха $P = 0,1$ МПа, подводимого к инструменту от компрессорной станции. Давление было выбрано максимально возможным, которое выдавала компрессорная станция ВК25Т-8-500Д при данном расходе воздуха в инструменте.

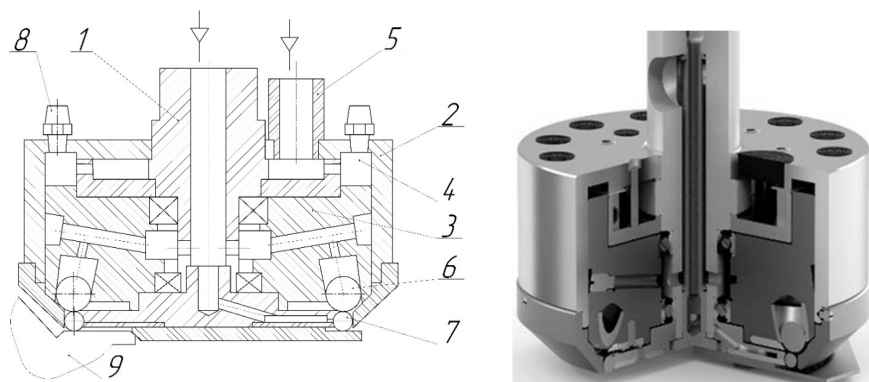


Рис. 1. Инструмент для пневмоударной обработки плоских поверхностей из различных материалов: 1 – полый вал; 2 – корпус; 3 – диск; 4 – лопатки; 5 – штуцер; 6 – приводящие шары; 7 – деформирующие шары; 8 – пневмоглушители; 9 – заготовка

Табл. 1. Параметры шероховатости стальной поверхности после шлифования с СОЖ

Метод получения исходной поверхности	Ra , мкм	Rpk , мкм	Rk , мкм	Rvk , мкм	$Rpk + Rk$, мкм	Mz , %	V_0 , мм ³ /см ²
Шлифование	0,197	0,257	0,606	0,323	0,863	88,675	0,0018
	0,236	0,243	0,827	0,313	1,070	91,250	0,0014
	0,198	0,222	0,661	0,245	0,883	91,575	0,0010

Величину зазора между основанием инструмента и плоскостью обрабатываемой поверхности варьировали в диапазоне от 1 до 1,2 мм. Значение подачи стола станка варьировали в диапазоне от 51 до 196 мм/мин. Выставлять значение подачи менее 51 мм/мин нецелесообразно, т. к. обработка пневмоударом становится малопроизводительной, а при подачах больше 196 мм/мин плотность распределения лунок на обрабатываемой поверхности снижается до 50 %...60 %. Значения выставленных на станке величин подач ограничены стандартным рядом подач на универсальном фрезерном станке JUM-1464.

Получены экспериментальные зависимости шероховатости обработанной стальной поверхности от величины подачи стола станка при величинах зазора между основанием инструмента и плоскостью обрабатываемой поверхности, равных 1,2 (рис. 2) и 1 мм (рис. 3).

Экспериментальные кривые показали, что после упрочняющей пневмоударной обработки стальной шлифованной поверхности, шероховатость возрас-

Как известно, на качество изготовленного абразивного инструмента влияет множество факторов: свойства зерна, форма зерна и его размер, свойства связки и различных наполнителей и т. д. На часть из них можно оказывать целенаправленное влияние, улучшая качественные показатели абразивного инструмента, но на другие, ввиду сложности происходящих физико-химических процессов, а также неконтролируемых характеристик абразивного зерна или связки, – невозможно. Чтобы избежать данной ситуации, необходимо проверять исходные свойства абразивного материала и связки, а при отклонении их от заявленных вносить корректировку в рецептуру и технологию изготовления. Но, увы, это не осуществляется [4].

К основным показателям свойств абразивных материалов, которые желательно контролировать при изготовлении абразивного инструмента, можно отнести: зерновой состав, разрушаемость, режущая способность, прочность зерен, износостойкость, полирующая способность. Данные показатели сложно и трудоемко оценить без специальных измерительных приборов, которых на современном рынке не представлено совсем или в ограниченном количестве. Из всех вышеперечисленных показателей современными приборами можно осуществить контроль прочности и полирующей способности абразивного зерна. К таким приборам относятся серийно выпускаемые лабораторные мельницы (прочность абразивного зерна) и приборы контроля шероховатости (полирующая способность зерна).

Для оценки остальных показателей в НПО «Всесоюзный научно-исследовательский институт абразивов и шлифования» была разработана серия приборов, таких как ППЗР-2 (оценка прочности зерен), РСЗ-2 (оценка режущей способности зерен), ШЛИФ (оценка прочности зерен).

Несмотря на то, что вышеописанное оборудование облегчает процесс контроля свойств абразивных материалов, он остается трудоемким. Весь процесс, вплоть до регистрации показаний и обработки результатов, выполняется вручную. Кроме того, отсутствует возможность хранения и накопления данных, полученных в результате проведенной работы. Приборы ШЛИФ, РСЗ-2, ППЗР-2 и им подобные уже морально и физически устарели и не соответствуют современным представлениям об автоматизированном контроле и анализе. Конструктивные решения, используемые в этих приборах, не позволяют оценивать свойства современных абразивных материалов. Так, РСЗ-2 не может имитировать работу абразивных кругов при скоростях резания свыше 60 м/с. Все приборы громоздки и тяжелы, отсутствует цифровая система сбора и обработки получаемой информации.

Работа по модернизации данных приборов ведется уже в НТЦ «Волжский научно-исследовательский институт абразивов и шлифования».

Исходя из вышесказанного, основная задача работы заключается в модернизации существующих и разработке новых приборов, позволяющих производить оценку основных свойств абразивных материалов или уже готовых изделий из них. В каждый прибор будет закладываться возможность контроля параметров, изменяемых в процессе проведения экспериментов по оценке

УДК 681.518.5

А. В. САВЧИЦ, канд. техн. наук**В. М. ШУМЯЧЕР**, д-р техн. наук, проф.

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (Волжский, Россия)

ОЦЕНКА СВОЙСТВ АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА И ИНСТРУМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ

Аннотация

При изготовлении абразивного инструмента наблюдается достаточно высокий процент брака. В основном это связано с тем, что в процессе изготовления инструмента не учитываются исходные свойства абразивных материалов, что приводит к нарушению всей технологической цепочки. В качестве выхода из сложившейся ситуации предлагается разработка автоматизированной информационно-измерительной системы. Основу системы составляет комплекс измерительных приборов, позволяющих на ранней стадии оценить свойства абразивных материалов и скорректировать рецептуру для достижения наилучших характеристик. Система также включает в себя оборудование для оценки основных свойств готовых абразивных инструментов, что позволяет хранить данные в базе данных и оперативно отслеживать и исправлять любые неточности в рецептуре.

Такая система позволит контролировать весь процесс изготовления абразивного инструмента, что приведет к снижению брака и повышению качества абразивного инструмента.

Ключевые слова:

абразивные материалы, шлифзерно, абразивный инструмент, разрушаемость зерна, режущая способность, информационно-измерительная система, измерительный прибор.

Современное производство трудно представить без использования абразивных инструментов, позволяющих обрабатывать различные материалы (шлифовать, полировать и т. д.). Абразивные инструменты состоят из большого количества абразивных зерен, соединенных специальными связками. Поэтому основные свойства абразивных инструментов определяются типом связки, распределением абразивных зерен по инструменту, технологией изготовления, а также материалом и свойствами абразивных зерен [1].

Технология изготовления абразивного инструмента хорошо изучена и за последние годы не претерпела существенных изменений. Наблюдаются небольшие усовершенствования и технологические разработки, но они не приводят к значительным и кардинальным изменениям [2].

В настоящее время абразивный инструмент изготавливается по рецептурной технологии. Такой подход предполагает использование абразивных материалов с заданными свойствами, однако эти свойства не всегда соответствуют заявленным. Это привело к тому, что при производстве абразивного инструмента 30 %...40 % готовой продукции оказывается бракованной [3].

тает в сравнении с исходной и составляет $Ra = 0,650 \dots 1,150$ мкм, что не превышает значения шероховатости $Ra = 1,25$ мкм, и укладывается в норматив. На поверхности заготовки образуется новый микрорельеф за счет пластического деформирования поверхностного слоя металла, появляется сетка лунок с перекрытием исходной поверхности до 100 %. Такая поверхность является более предпочтительной при работе пар трения, т. к. впадины хорошо удерживают смазочный материал, а поверхность меньше изнашивается.

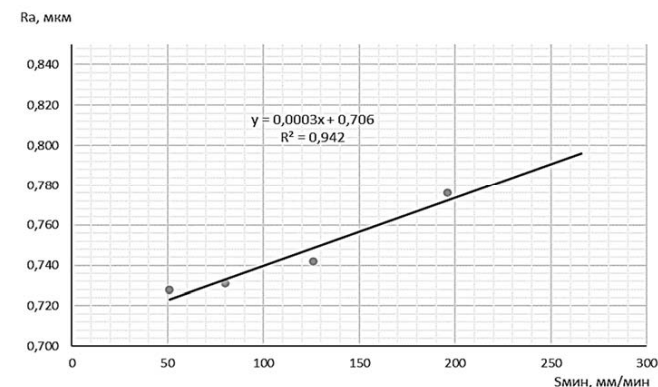


Рис. 2. График зависимости шероховатости, обработанной пневмударом шлифованной поверхности, от подачи ($P = 0,1$ МПа, $h = 1,2$ мм)

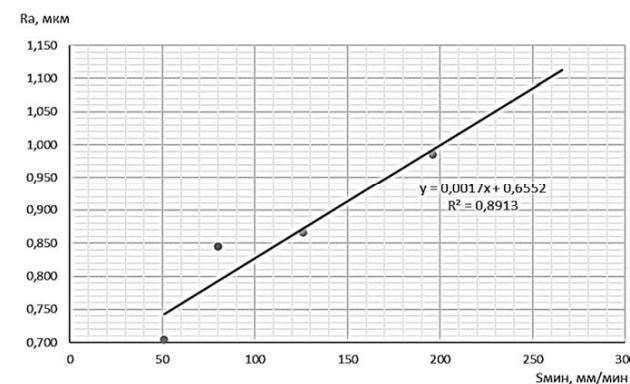


Рис. 3. График зависимости шероховатости, обработанной пневмударом фрезерованной поверхности, от подачи ($P = 0,1$ МПа, $h = 1$ мм)

Экспериментальные зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи стола станка построены с использованием линейной линии

тренда. В этом случае она хорошо сопоставима точкам данных, т. к. величина достоверности аппроксимации R^2 составляет 0,942 и 0,891 для зависимости на рис. 2 и 3 соответственно. Чем ближе величина аппроксимации к единице, тем лучше линия тренда соответствует анализируемым данным.

Экспериментальные исследования показали хорошие результаты при обработке стальных заготовок упрочняющей пневмоударной обработкой, однако необходимо проведение дальнейших работ в этой области, т. к. имеющихся результатов недостаточно для определения оптимальных режимов обработки.

Исследование параметров шероховатости поверхности стальных заготовок после упрочняющей обработки пневмоударом также показали свои преимущества в сравнении со шлифованной поверхностью. Параметры качества поверхности, обработанной пневмоударной обработкой, для последующего их анализа в соответствии со стандартом DIN EN ISO 13565:1998 представлены в табл. 2.

Табл. 2. Параметры шероховатости стальной поверхности после упрочняющей пневмоударной обработки

Зазор h , мм	P , МПа	S , мм/мин	Ra , мкм	R_{pk} , мкм	R_k , мкм	R_{vk} , мкм	$R_{pk} + R_k$, мкм	Mr_2 , %	V_0 , мм ³ /см ²
1,0	0,1	51	0,782	1,562	2,003	0,646	3,565	91,075	0,0028
1,0	0,1	80	1,095	3,015	2,022	0,411	5,037	94,538	0,0011
1,2	0,1	51	0,705	1,011	2,325	0,851	3,336	91,513	0,0036
1,2	0,1	80	0,889	2,051	1,837	0,364	3,888	95,563	0,0008

Сравнительный анализ параметров R_{vk} , R_{pk} , R_k показал преимущества стальной поверхности после упрочняющей пневмоударной обработки над шлифованием с точки зрения прирабатываемости и несущей способности. Параметр R_{pk} , влияющий на уменьшение времени приработки, снижается после пневмоударной обработки, следовательно уменьшается интенсивность износа в этот период. Значение параметра R_k также уменьшается после упрочнения поверхности, следовательно центральная область микрорельефа обладает большей несущей способностью. Значительно снижается сумма параметров R_{pk} и R_k , что говорит об увеличении износостойкости поверхности после упрочняющей пневмоударной обработки.

Параметр R_{vk} увеличивается, что показывает увеличение маслосъемности V_0 поверхности после упрочняющей пневмоударной обработки.

Выводы.

1. Установлено, что упрочняющая пневмоударная обработка является предпочтительной для обработки стальных накладных направляющих станин станков.

2. Проведены экспериментальные исследования пневмоударной обработки стальных заготовок, получены первые результаты режимов обработки: подача $S = 51...80$ мм/мин, давление сжатого воздуха $P = 0,1$ МПа, величина зазора между основанием инструмента и плоскостью обрабатываемой поверхности $h = 1...1,2$ мм.

Контакты:

artyomradkevichbntu@gmail.com (Радкевич Артём Андреевич);
s.pauliukavets@gmail.com (Павлюковец Сергей Анатольевич).

A. A. RADKEVICH, S. A. PAULIUKAVETS

SIMULATION OF A METHOD FOR CHECKING THE ELECTRIC BUS TRACTION DRIVE BY HEATING BY THE EQUIVALENT CURRENT METHOD

Abstract

A simulation model has been developed for calculating the equivalent stator current of an electric bus traction drive. Based on this model, a study of the equivalent stator current of the ТАД-155-04-БУ1 asynchronous motor was carried out in three modes of electric bus movement. The study showed that the motor is suitable for heating, and the model can be adapted to determine equivalent power and torque values when testing electric drives for heating.

Keywords:

traction electric drive, electric bus, equivalent current method, heating test, asynchronous electric drive, simulation model.

По полученным графикам определим максимальные значения тока за цикл в каждом из режимов движения. В режиме движения без уклона $I_{ЭКВ}$ составляет 145 А, в режиме движения в гору с уклоном 18 % $I_{ЭКВ} = 225$ А, в режиме движения под гору с уклоном 18 % $I_{ЭКВ} = 230$ А. Далее подставим полученные значения в формулу (2):

$$I_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 145^2 \cdot 43,207 + 225^2 \cdot 43,207 + 230^2 \cdot 43,396}{129,81}} = 203,7 \text{ А.}$$

Поскольку рассчитанное значение $I_{ЭКВ} = 203,7 \text{ А} < I_H = 300 \text{ А}$, то тяговый асинхронный электродвигатель ТАД-155-04-БУ1 подходит по нагреву для использования в электробусе.

Заключение. Таким образом, в результате исследования разработана компьютерная модель определения эквивалентного тока статора тягового электропривода электробуса, учитывающая данные, полученные при моделировании режимов движения на основании нагрузочных диаграмм электропривода, не прибегая к вычислениям. На примере моделирования асинхронного двигателя ТАД-155-04-БУ1 были определены значения эквивалентных токов статора при трёх режимах движения электробуса и сделан вывод о том, что этот двигатель подходит по нагреву. Данный способ является более точным определением эквивалентного тока, чем непосредственный расчёт каждого участка нагрузочной диаграммы по формуле (2), поскольку для его выполнения нет необходимости рассчитывать значения токов в зоне II регулирования скорости, что зачастую является проблематичным, а разработанная компьютерная модель может быть адаптирована для определения эквивалентных значений мощности и моментов при проверке электроприводов по нагреву.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богдан, Н. В.** Троллейбус. Теория, конструирование, расчет / Н. В. Богдан, Ю. Е. Атаманов, А. И. Сафонов; под ред. Н. В. Богдана. – Минск: Ураджай, 1999. – 346 с.
2. **Peng, Z.** Analysis and Implementation of Constrained MTPA Criterion for Induction Machine Drives / Z. Peng // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 176445–176453.
3. Трёхзонная система векторного частотного управления асинхронным электроприводом / Р. Т. Шрейнер [и др.] // VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – С. 433–437.
4. **Opeiko, O. F.** Reference Input Signals Formation for Induction Motor Control in Traction Drive / O. F. Opeiko // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* – 2023. – № 66 (3). – P. 205–214.
5. Improved Online Optimization-Based Optimal Tracking Control Method for Induction Motor Drives / Tarvirdilu-Asl R [et al.] // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. – № 35. – P. 10654–10672.

3. Полученные экспериментальные зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи показали, что шероховатость возрастает до $Ra = 0,650 \dots 1,150$ мкм в сравнении с исходной шлифованной поверхностью, но не превышает значения $Ra = 1,25$ мкм и укладывается в норматив. На поверхности заготовки образуется новый микрорельеф в виде сетки лунок, который хорошо удерживает смазочный материал, и поверхность меньше изнашивается.

4. Установлено, что при упрочняющей пневмоударной обработке с увеличением зазора между плоскостью инструмента и заготовкой параметр шероховатости поверхности Ra немного возрастает для предварительно шлифованных поверхностей и практически не изменяется для предварительно фрезерованных поверхностей.

5. Сравнительный анализ параметров шероховатости стальной поверхности, полученных после упрочняющей пневмоударной обработки, показал ее преимущества над исходной шлифованной поверхностью по прирабатываемости, несущей способности, износостойкости и маслостойкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 294 с.
2. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – Москва: Машиностроение, 1979. – Кн. 2. – 358 с.
3. Анализ способов повышения износостойкости направляющих станин металлорежущих станков / А. П. Минаков [и др.] // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2016. – № 3 (52). – С. 40–50.
4. **Камчицкая, И. Д.** Упрочняющая технология восстановления направляющих станин станков на основе лезвийной и пневмовибродинамической обработки: дис. ... канд. техн. наук / И. Д. Камчицкая. – Могилев, 2006. – 129 л.
5. **Ильюшина, Е. В.** Исследование технологических возможностей упрочняющей обработки пневмоударом плоских поверхностей алюминиевых заготовок / Е. В. Ильюшина, Н. М. Юшкевич // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2022. – № 3 (76). – С. 30–41.

Контакты:

sktb-pvdo@mail.ru (Ильюшина Елена Валерьевна);
gonami.yu@gmail.com (Юшкевич Надежда Михайловна).

E. V. ILYUSHINA, N. M. YUSHKEVICH

RESEARCH OF STRENGTHENING PNEUMATIC IMPACT TREATMENT OF FLAT SURFACES

Abstract

The paper presents studies of strengthening pneumatic impact treatment of flat steel surfaces, which are used for the manufacture of overhead guides of machine tool stand. Experimental dependences of the roughness of the machined surface on the feed were obtained, and an analysis of the roughness parameters was carried out.

Keywords:

hardening pneumatic impact treatment, surface roughness, hardening, wear, guides.

УДК 621.83.06, 621.9.08

А. В. КАПИТОНОВ, канд. техн. наук, доц.

Б. С. ЮРКЕВИЧ

С. С. БОЧКАРЕВ

А. Ш. КУРБАННАЗАРОВ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С БЕГОВЫМИ ДОРОЖКАМИ

Аннотация

Разработана методика компьютерного моделирования погрешностей обработки много-периодных дорожек планетарных шариковых и роликовых передач. Получены эпюры напряженно-деформированного состояния обрабатывающего инструмента и деталей с много-периодными дорожками с результатами перемещений, напряжений и деформаций материала. Получены численные значения перемещений при упругих деформациях объектов моделирования под действием заданных сил резания. Установлено, что для данного типа передач, проектируемых с высокой точностью, необходимо выполнять отделочные операции обработки многопериодных дорожек. Проведенные исследования позволяют прогнозировать точность изготовления деталей с многопериодными беговыми дорожками для планетарных шариковых и роликовых передач.

Ключевые слова:

многопериодные беговые дорожки, упругие деформации, компьютерное моделирование.

Исследования, проведенные в [1–4], показали, что значительную долю суммарной погрешности обработки дорожек планетарных шариковых и роликовых передач составляют упругие деформации технологической системы. Так, погрешности от влияния упругих деформаций станка и станочного приспособления можно рассчитать по [5]. Погрешности, возникающие вследствие упругих деформаций обрабатывающего инструмента и деталей с беговыми дорожками ввиду их сложной геометрии, наиболее точно можно определить, используя методы конечных элементов. Для этого использовались технологии компьютерного 3D-моделирования в программной среде SolidWorks со встроенными модулями CAD/CAE, позволяющими создавать трехмерные твердотельные модели и проводить статический анализ напряжений и перемещений.

Построены 3D-CAD-модели режущего инструмента – фрез, которые используются для обработки беговых дорожек и модели деталей с беговыми дорожками. На рис. 1 показаны модели концевых фрез для черновой и чистовой обработки открытых и закрытых многопериодных беговых дорожек планетарных шариковых и роликовых передач.

Фреза диаметром 15 мм используется для обработки колес с открытыми беговыми дорожками с числом периодов $z_2 = 6$. Фреза диаметром 8 мм используется для обработки дисков с закрытыми беговыми дорожками с числом периодов $z_2 = 10$.

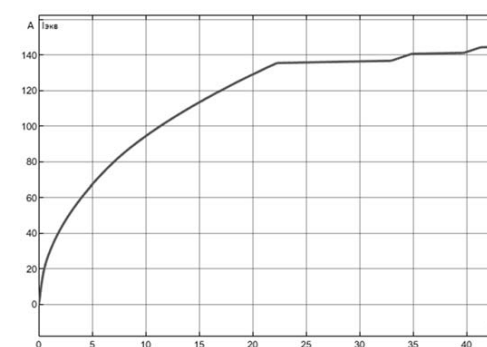


Рис. 2. График эквивалентного тока за цикл работы электропривода в режиме движения без уклона

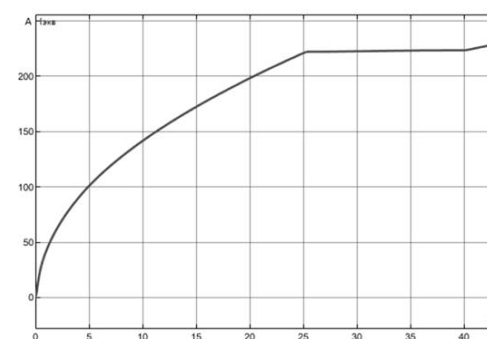


Рис. 3. График эквивалентного тока за цикл работы электропривода в режиме движения в гору с уклоном 18 %

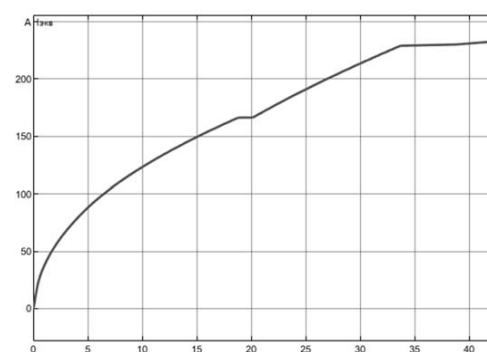


Рис. 4. График эквивалентного тока за цикл работы электропривода в режиме движения под гору с уклоном 18 %

участков движения, с; β_{OXI} – коэффициент охлаждения на i -м участке нагрузочной диаграммы; n – число участков в цикле.

Для проверки электродвигателя по нагреву, поскольку применяется двухзонное регулирование скорости, необходимо использовать метод эквивалентного тока. Для этого визуализируем формулу (2) и соберем подсистему определения эквивалентного тока в имитационной модели тягового электропривода электробуса в программном пакете Matlab Simulink. Полученная модель показана на рис. 1.

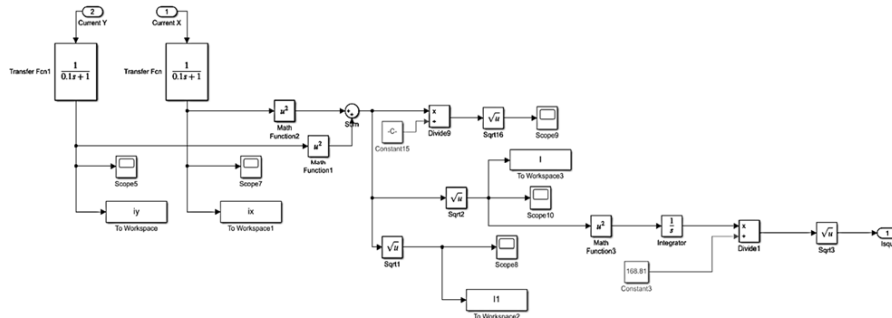


Рис. 1. Имитационная модель определения эквивалентного тока тягового электропривода электробуса в Matlab Simulink

Моделирование проверки электропривода по нагреву. Произведём моделирование способа проверки асинхронного тягового электропривода ТАД-155-04-БУ1 городского электробуса в соответствии с разработанной имитационной моделью, изображённой на рис. 1.

Номинальные параметры электродвигателя ТАД-155-04-БУ1, согласно техническим характеристикам, следующие: номинальная мощность $P_H = 155$ кВт; номинальная частота вращения $n_H = 1500$ об/мин; номинальный линейный ток статора $I_H = 300$ А; изоляция обмоток соответствует классу нагревостойкости Н, допустимая температура нагрева которых составляет до 180°C .

Моделирование проверки электропривода будет производиться при трех режимах движения электробуса: без уклона (статический момент $M_C = 142,2$ Н·м); в гору с уклоном 18 % ($M_C = 728,064$ Н·м); под гору с уклоном 18 % ($M_C = -484,902$ Н·м). Рассматриваемые режимы включают в себя разгон, в том числе в зоне II регулирования скорости и до максимальной скорости, выбег и торможение. Графики результатов моделирования при трёх режимах движения электробуса, полученные в программном пакете Matlab Simulink, показаны на рис. 2–4.

На рис. 2 показаны 3D-CAD-модели деталей с многопериодными беговыми дорожками.

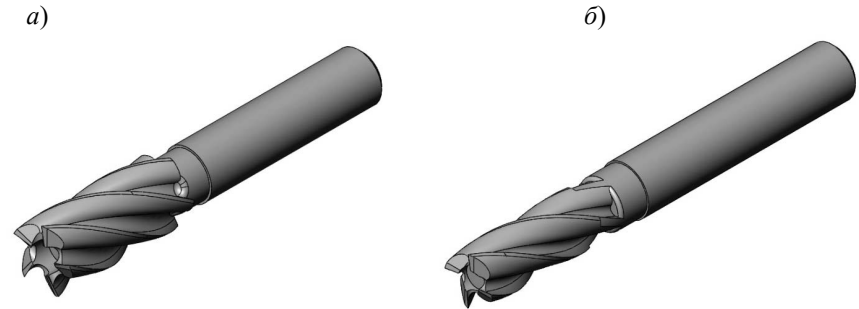


Рис. 1. Модели концевых фрез для черновой и чистовой обработки открытых и закрытых многопериодных беговых дорожек: а – концевая фреза диаметром 15 мм; б – концевая фреза диаметром 8 мм

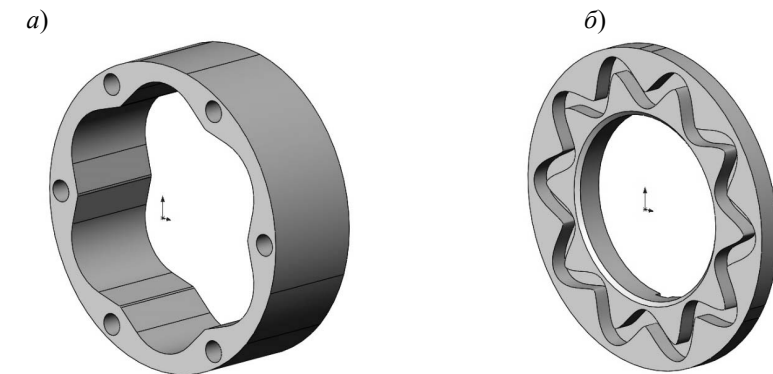


Рис. 2. Модели деталей с многопериодными беговыми дорожками: а – колесо с открытой многопериодной беговой дорожкой; б – диск с закрытой многопериодной беговой дорожкой

На рис. 2, а показано колесо с открытой внутренней поверхностью беговой дорожки с числом периодов $z_2 = 6$. На рис. 2, б показан диск с закрытой беговой дорожкой, выполненной на торце, с числом периодов $z_2 = 10$. По беговым дорожкам могут перемещаться как шариковые, так и роликовые сателлиты.

В расчетном модуле SolidWorks Simulation (CAE) проведен статический анализ напряженно-деформированного состояния моделей, представленных на рис. 1 и 2. Инструмент и детали с многопериодными дорожками нагружались силами резания, соответствующими виду чистовой обработки. Задавался материал моделей – инструментальная и легированная сталь, его физические свойства, крепление, силы резания, сетка и все необходимые параметры для расчета в модуле методом конечных элементов. Силы резания рассчитывались в

соответствии с известными методиками [5] и разработанной технологией изготовления деталей с беговыми дорожками.

На рис. 3 показаны модели инструмента – концевых фрез с заданными параметрами крепления, сил резания и сетки для статического анализа.

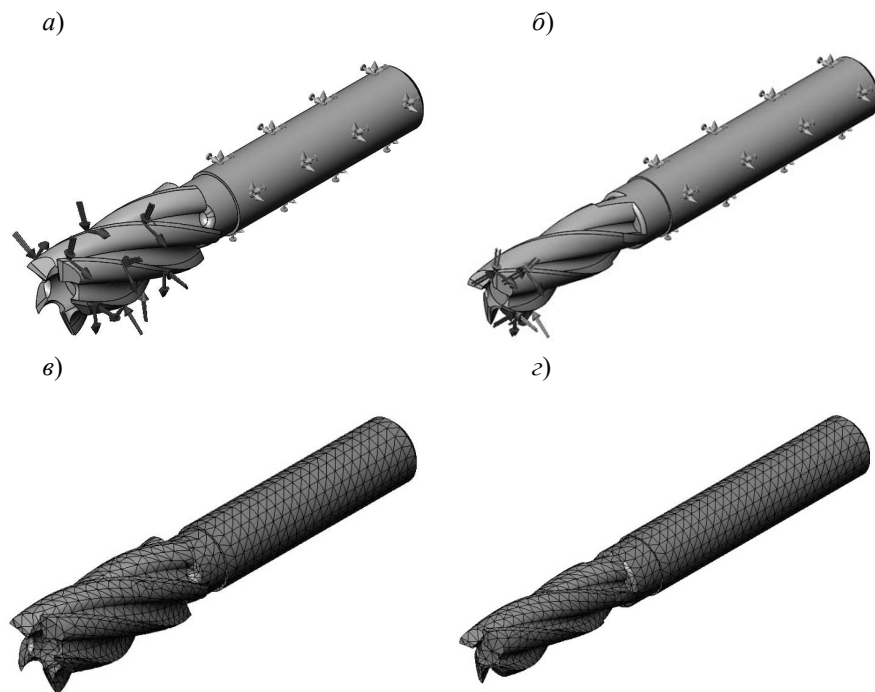


Рис. 3. Модели концевых фрез с заданными параметрами крепления, сил резания и сетки: *a* – фреза диаметром 15 мм с заданным креплением и силами резания; *б* – фреза диаметром 8 мм с заданным креплением и силами резания; *в* – фреза диаметром 15 мм с заданной сеткой; *г* – фреза диаметром 8 мм с заданной сеткой

На рис. 4 показаны результаты моделирования напряженно-деформированного состояния фрезы диаметром 15 мм при нагружении силами резания: эпюра перемещения.

Также получены эпюры напряжений и деформаций. Аналогичные эпюры получены для концевых фрез диаметром 8 мм. Напряжения не превышают предела текучести материала.

На рис. 5 показаны модели деталей с многопериодными дорожками с заданными параметрами крепления, сил резания и сетки для статического анализа.

На рис. 6 показаны результаты моделирования напряженно-деформированного состояния деталей с многопериодными дорожками при нагружении их силами резания: эпюры перемещения.

системе электропривода работает в двух зонах регулирования скорости, с изменением магнитного потока в зоне II регулирования. Следовательно, среднеквадратичный (эквивалентный) момент двигателя M_{Σ} , Н · м, не отражает его среднюю температуру нагрева. Проверку двигателя по нагреву в этом случае целесообразно осуществлять методом эквивалентного тока. Однако можно также использовать и метод эквивалентного момента, поскольку он дает запас по мощности.

При этом определение эквивалентного значения тока статора на i -м участке нагрузочной диаграммы в зоне II регулирования скорости (при относительной частоте $\alpha > 1$) при пониженном магнитном потоке и электромагнитном моменте и максимальных значениях напряжения и тока статора [1] определяется корнем квадратным из суммы векторов токов статора по осям d – q , величины которых могут быть для исследуемого электродвигателя не определены. При достижении электробусом максимальной скорости движения, в частности при разгоне под гору, и переходе электропривода в зону III регулирования напряжение статора остается неизменным, а магнитный поток и электромагнитный момент продолжают уменьшаться [2, 3]. Максимальное значение тока статора оказывается излишним для достижения максимального момента, а абсолютное значение скольжения приближается к критическому значению [4].

Исходя из этого, актуальной задачей для исследования является разработка компьютерной модели проверки электропривода электробуса по нагреву методом эквивалентного тока, которая позволила бы получить наиболее точные результаты расчёта эквивалентного тока для всех режимов движения электробуса, не прибегая к вычислениям каждого отрезка нагрузочной диаграммы.

Разработка имитационной модели. Суть метода эквивалентного тока заключена в выполнении неравенства

$$I_{\text{ЭКВ}} \leq I_{\text{НОМ}},$$

где $I_{\text{ЭКВ}}$ – изменяющийся во времени эквивалентный по условиям нагрева действительному изменяющемуся во времени току двигателя ток, А; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток двигателя, А.

Значение эквивалентного тока за цикл работы электродвигателя $I_{\text{ЭКВ}}$ определяется исходя из формулы [5]

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_{\Sigma i}^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_{\Sigma i} \cdot \beta_{\text{ОХЛ}}}}, \quad (2)$$

где $I_{\Sigma i}$ – значение эквивалентного тока статора на i -м участке нагрузочной диаграммы, А; t_i – время интервала в цикле, с; $t_{\Sigma i}$ – время цикла каждого из

А. А. РАДКЕВИЧ

С. А. ПАВЛЮКОВЕЦ, канд. техн. наук, доц.

Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБА ПРОВЕРКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОБУСА ПО НАГРЕВУ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ТОКА

Аннотация

Разработана имитационная модель расчёта эквивалентного тока статора тягового электропривода электробуса. На основании данной модели проведено исследование эквивалентного тока статора асинхронного двигателя ТАД-155-04-БУ1 при трёх режимах движения электробуса. Исследование показало, что двигатель подходит по нагреву, а модель может быть адаптирована для определения эквивалентных значений мощности и моментов при проверке электроприводов по нагреву.

Ключевые слова:

тяговый электропривод, электробус, метод эквивалентного тока, проверка по нагреву, асинхронный электропривод, имитационная модель.

Введение. В связи с тем, что режим работы тягового электропривода электробуса можно охарактеризовать как повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением (S5), возникают проблемы контроля температуры обмоток электродвигателя для недопущения его перегрева. Проверка электродвигателя по нагреву определяется, в первую очередь, нагревостойкостью изоляционных материалов его обмоток. Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с максимальной рабочей. Электродвигатель работает в допустимом тепловом режиме при соблюдении выражения

$$\tau_{РАБ} < \tau_{ДОП}, \quad (1)$$

где $\tau_{РАБ}$ – максимальный перегрев двигателя при работе, с; $\tau_{ДОП}$ – допустимый перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции, с.

Проверка условия (1) может выполняться прямым методом путем составления математической модели теплового режима двигателя на каждом участке нагрузочной диаграммы. Однако для этого необходимо знать параметры теплоемкости, которые в процессе проектирования электропривода зачастую неизвестны.

Среди косвенных способов проверки электродвигателя по нагреву известны метод эквивалентного тока, метод эквивалентного момента, метод эквивалентной мощности, метод тепловых моделей, которые подразумевают расчёт эквивалентных значений величин на основании анализа данных каждого отрезка нагрузочной диаграммы электропривода. В некоторых случаях, в частности при расчёте электропривода электробуса, электродвигатель в

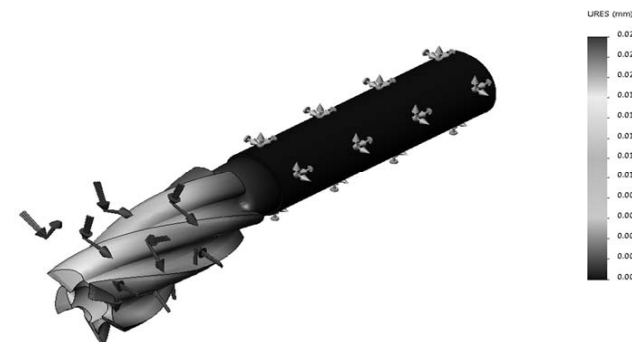


Рис. 4. Эпюра перемещения фрезы диаметром 15 мм

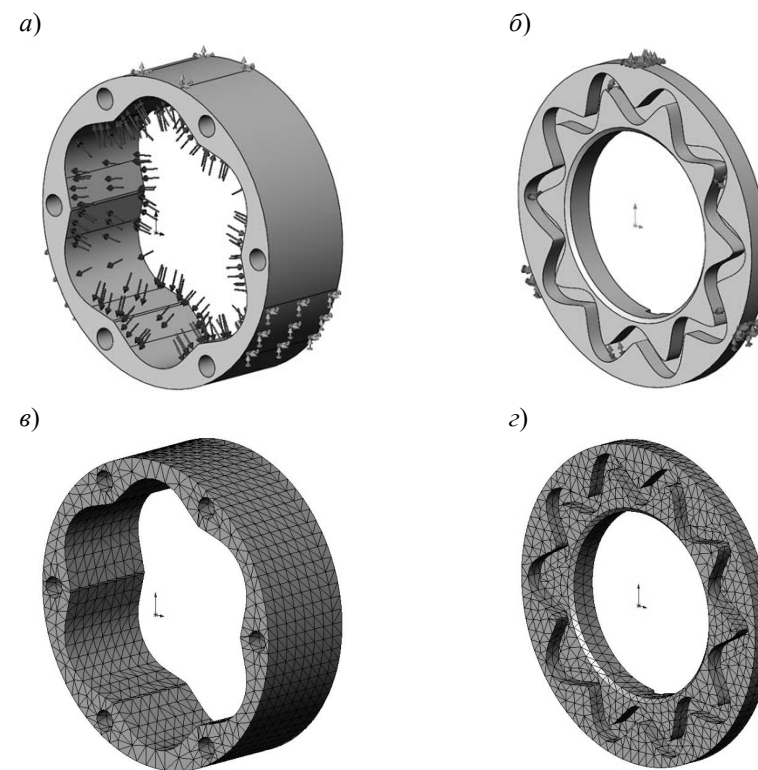


Рис. 5. Модели деталей с многопериодными дорожками с заданными параметрами крепления, сил резания и сетки: а – колесо с многопериодной дорожкой; б – диск с многопериодной дорожкой; в – колесо с заданной сеткой; г – диск с заданной сеткой

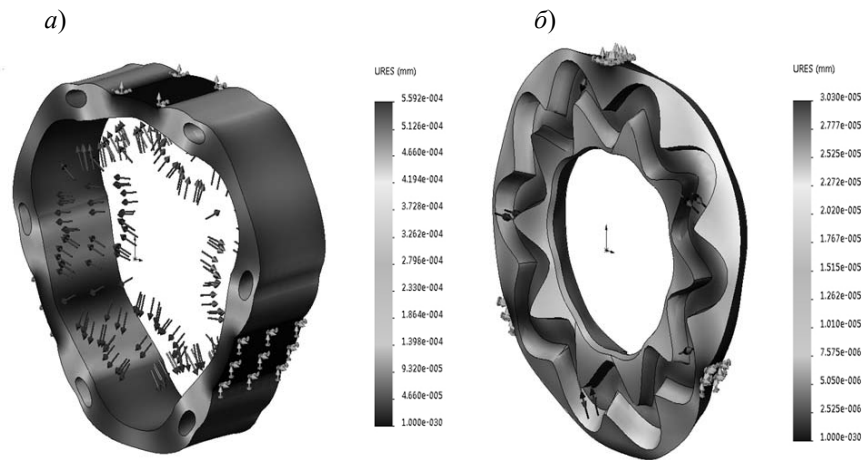


Рис. 6. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния деталей с многопериодными дорожками: *а* – эпюра перемещений колеса; *б* – эпюра перемещений диска

Выводы. В результате проведенных исследований разработана методика компьютерного моделирования погрешностей, которые могут возникать при обработке многопериодных дорожек планетарных шариковых и роликовых передач. Получены эпюры напряженно-деформированного состояния обрабатываемого инструмента и деталей с многопериодными дорожками с результатами перемещений, напряжений и деформаций материала. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что упругие деформации (перемещение материала заготовки) при заданных силах резания чистовой обработки для деталей с многопериодными дорожками незначительны и не превышают 0,0006 мм. Упругие перемещения обрабатываемого инструмента под действием сил резания составляют 0,024 мм и более для фрез меньшего диаметра, что, например, при диаметре многопериодной беговой дорожки 105 мм соответствует 7-му качеству точности. Так как на точность обработки деталей с многопериодными дорожками влияют и другие известные погрешности, кроме упругих деформаций, а также термическая обработка дорожек, то в процессе изготовления точность расположения дорожки относительно ее номинального положения может уменьшаться на 1–3 качества, что соответствует средней точности изготовления и приведет к уменьшению кинематической точности шариковых и роликовых передач. Поэтому для данного типа передач, проектируемых с высокой точностью, необходимо выполнять отделочные операции обработки многопериодных дорожек. Проведенные исследования позволяют прогнозировать точность изготовления деталей с многопериодными беговыми дорожками для планетарных шариковых и роликовых передач.

лера TMS320F28035; для написания программы управления – среда разработки Code Composer Studio.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атаманов, Ю. Е. Теория электрического и автономного транспорта. Общая характеристика: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт» / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.
2. Нго, Ф. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля. Энергетика / Ф. Нго, Г. И. Гульков // Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – № 60 (1). – С. 41–53.
3. Гульков, Г. И. Микропроцессорное управление с синхронным двигателем с постоянными магнитами / Г. И. Гульков, Ф. Нго // Наука – образованию, производству, экономике: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 235.

Контакты:

artyomradkevichbntu@gmail.com (Радкевич Артём Андреевич).

A. A. RADKEVICH

MICROPROCESSOR CONTROL OF ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC DRIVE OF A ROBOTIC ELECTRIC BUS

Abstract

The article discusses the issue of designing a microprocessor control system for the traction electric drive of a robotic electric bus based on drawing up a control program algorithm for a pre-planned route in the urban cycle. A microprocessor module based on the TMS320F28035 microcontroller was chosen as a software implementation device. The compiled algorithm allows both the regulation of the speed of the electric drive in accordance with the timing of time intervals and the implementation of vector control of the traction electric drive, and also allows for the possibility of driver intervention in the control process.

Keywords:

microprocessor, microcontroller, asynchronous electric motor, traction electric motor, electric bus, robotic electric bus, development environment.

Выбор микроконтроллера и среды разработки. Для аппаратной реализации составленного алгоритма микропроцессорного управления тяговым электроприводом транспортных средств в настоящее время широко используются цифровые сигнальные процессоры семейств LPC3180, C5000, TMS320, PIC32 и др. [3].

Поскольку силовая цепь тягового электропривода электробуса содержит автономный инвертор напряжения, необходимо согласовывать входные и выходные параметры микроконтроллера и платы драйверов транзисторных IGBT-модулей АИН. По этой причине для тяговых электроприводов транспортных средств существуют комплекты АИН с микропроцессорным управлением. Для выполнения задачи управления электроприводом роботизированного электробуса используют микропроцессорный модуль SDMC-103-03.01 на основе микроконтроллера TMS320F28035, который включает в себя силовой модуль транзисторных IGBT-модулей MF-250/05-02-01, модуль сглаживающих устройств МІЗ-01, платы драйверов транзисторных ключей 2ED60017-ST с передачей информации по интерфейсу CAN.

Микропроцессорный модуль выполняет сбор данных и управление низковольтными элементами управления, которые расположены в кабине водителя, такими как педали акселератора и тормоза, селектор направления движения, датчики тока, скорости и напряжения. Задачей микроконтроллера TMS320F28035 является формирование необходимых управляющих сигналов для силовых ключей инвертора. Микроконтроллер формирует команды управления частотным преобразователем в цифровом коде, передает команды управления двигателем по оптическому интерфейсу в соответствии с программой управления. Выходные сигналы с микроконтроллера передаются на плату драйверов, на выходе которой формируется сигнал требуемой скважности на транзисторные IGBT-модули.

Разработка программы управления микроконтроллером осуществляется в интегрированной среде разработки Code Composer Studio (CCS). Программа управления может быть выполнена как на низкоуровневом языке ассемблера, так и на высокоуровневом языке C в соответствии с алгоритмом управления. Среда CCS позволяет осуществить отладку и произвести компиляцию программы управления с записью и просмотром значений регистров.

Заключение. Таким образом, в результате решения задач микропроцессорного управления тяговым электроприводом роботизированного электробуса был составлен маршрут автономного движения транспортного средства в соответствии с циклами разгона и торможения определенной длительности. На основании заданного маршрута движения был составлен алгоритм управления тяговым электроприводом, учитывающий как выполнение заданных циклов регулирования скорости электропривода с определённой выдержкой времени с возможностью вмешательства водителя, так и осуществления векторного управления асинхронным электродвигателем. Для аппаратной реализации алгоритма управления был выбран микропроцессорный модуль SDMC-103-03.01 на основе микроконтрол-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
2. **Капитонов, А. В.** Метод расчета параметров точности изготовления колес с многопериодными дорожками планетарных шариковых передач / А. В. Капитонов, Р. Г. Якубовский // Вестн. Витебского гос. технол. ун-та. – 2022. – № 1 (42). – С. 43–52.
3. **Капитонов, А. В.** Разработка показателей для контроля точности изготовления многопериодных дорожек планетарных передач с телами качения / А. В. Капитонов // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2021. – Вып. 10. – С. 7–12.
4. **Капитонов, А. В.** Точность и контроль малогабаритных планетарных механизмов: монография / А. В. Капитонов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 160 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 656 с.

Контакты:

kavbru@gmail.com (Капитонов Александр Валентинович);
yurkevich@mail.ru (Юркевич Борис Сергеевич);
bochkarev@mail.ru (Бочкарев Станислав Сергеевич);
kurbannazarov@mail.ru (Курбанназаров Абдыресул Шохратович).

A. V. KAPITONOV, B. S. YURKEVICH, S. S. BOCHKAREV, A. S. KURBANNAZAROV

COMPUTER MODELING OF ELASTIC DEFORMATIONS IN THE DESIGN OF METHODS FOR PROCESSING PARTS WITH TREADMILLS

Abstract

The technique of computer modeling of errors processing of multi-period tracks of planetary ball and roller gears has been developed. Diagrams of the stress-strain state of the machining tool and parts with multi-period tracks with the results of displacements, stresses and deformations of the material are obtained. Numerical values of displacements under elastic deformations of modeling objects under the action of specified cutting forces are obtained. It is established that for this type of transmission, designed with high accuracy, it is necessary to perform finishing operations for processing multi-period tracks. The conducted research makes it possible to predict the accuracy of manufacturing parts with multi-period treadmills for planetary ball and roller gears.

Keywords:

multi-period treadmills, elastic deformations, computer modeling.

УДК 621.914.1

О. Н. КЛЯУС**А. А. ЖОЛОбОВ**, канд. техн. наук, проф.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

**К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ
ФРЕЗЕРОВАНИЕМ****Аннотация**

Рассмотрена методика теоретического определения наиболее эффективного метода высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием на основе комплексного критерия – основное время T_o + работа A .

Ключевые слова:

высокоскоростная обработка фрезерованием, отверстие, фреза, круговая интерполяция, винтовая интерполяция.

Введение. Высокоскоростная обработка (ВСО) отверстий фрезерованием достигла значительного прогресса. Этот метод обеспечивает более эффективное получение точной и качественной поверхности детали по сравнению с растачиванием. В ВСО существует два метода: круговая и винтовая интерполяции [1]. Рекомендации для каждого из них имеют ориентировочный характер, но примеры предпочтительного применения одного или другого метода очень редки.

В связи с этим предлагается методика выбора наиболее эффективного метода высокоскоростной обработки отверстий фрезерованием с точки зрения основного времени T_o и работы A , затрачиваемых на процесс на основании зависимостей [1].

Материалы и методы исследования. При фрезеровании отверстия методом винтовой интерполяции длина рабочего хода центра инструмента L_p для каждого i -го рабочего хода в направлении осевой подачи рассчитывается следующим образом:

$$L_{pi} = N \cdot \sqrt{(\pi \cdot D_{vfi})^2 + h^2}, \quad (1)$$

где N – количество витков; h – шаг интерполяции, мм; D_{vfi} – диаметр траектории центра инструмента на текущем переходе, мм [1]; $i = 1 \dots n$.

$$D_{vfi} = D_{mi} - DC, \quad (2)$$

где D_{mi} – диаметр отверстия, полученного на текущем переходе (на начальном этапе $D_m = D_1$), мм; D_1 – начальный диаметр отверстия, мм; DC – диаметр инструмента, мм.

Соответственно, основное время для каждого i -го рабочего хода имеет свое

считывания сигналов датчиков. Когда прерывания от педалей не обрабатываются, ядро микроконтроллера отключено и микроконтроллер находится в режиме энергосбережения.

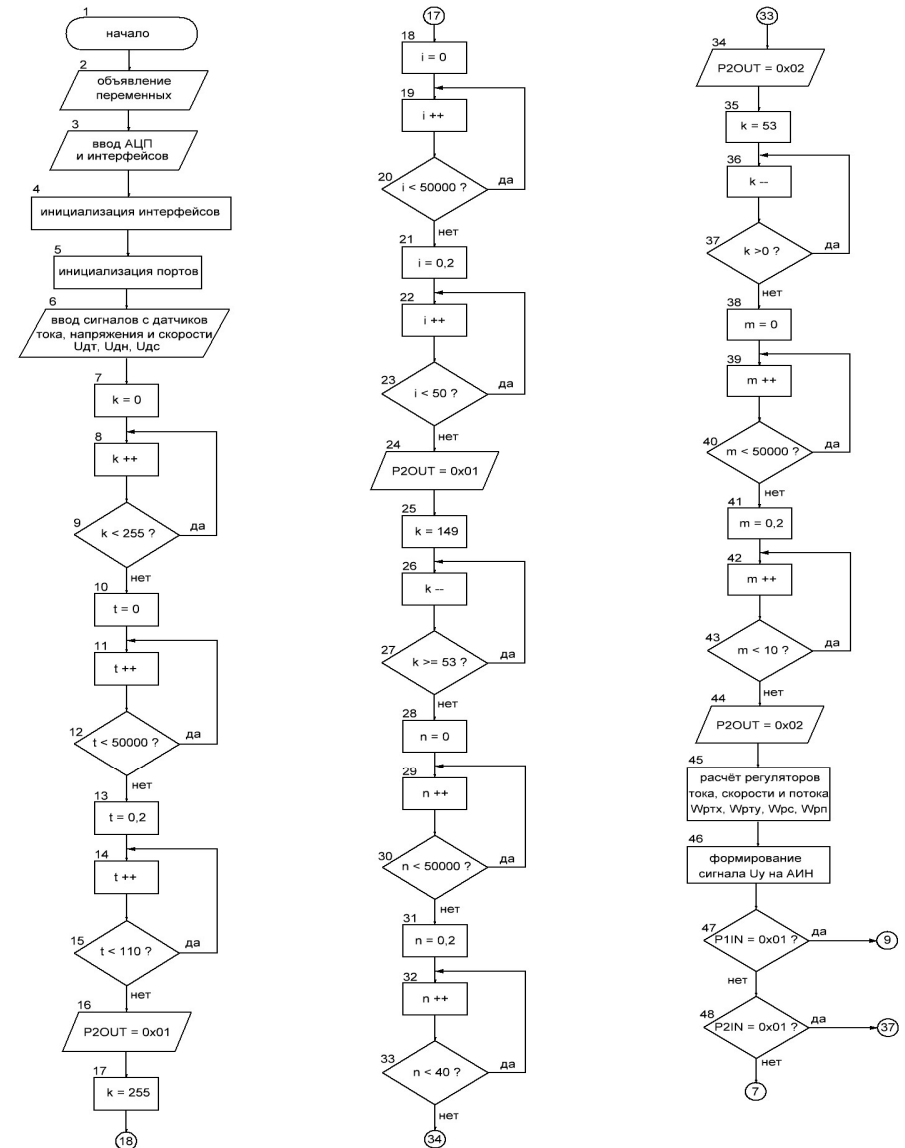


Рис. 2. Алгоритм микропроцессорного управления тяговым электроприводом роботизированного электробуса

Составление алгоритма управления. Для составления алгоритма управления тяговым электроприводом по заданному маршруту необходимо определить значения скоростей и интервалов времени на скоростной диаграмме. Согласно рекомендациям Международной ассоциации общественного транспорта режим работы электробуса в городских условиях соответствует лёгкому городскому циклу движения SORT 2 (Standardized On-Road Test Cycle), в соответствии с которым средняя скорость движения транспорта составляет 12 м/с. На основе анализа существующих конструкций электробусов допустим, что в качестве передаточного механизма, передающего вращательный момент от электропривода ведущим колёсам, используется дифференциал с радиусом приведения $\rho = 0,049$ м/рад. Исходя из этого, составим таблицу определения параметров скоростной диаграммы движения электробуса по маршруту (табл. 1).

Табл. 1. Значения параметров скоростной диаграммы движения электробуса по заданному маршруту

Скорость движения электробуса	Угловая скорость вращения вала электропривода	Временной интервал отрезка цикла
$\vartheta_1 = 2,6$ м/с	$\omega_1 = 53$ рад/с	$0 - t_2 = 22$ с
$\vartheta_2 = 3$ м/с	$\omega_2 = 61$ рад/с	$t_2 - t_3 = 10$ с
$\vartheta_3 = 7,3$ м/с	$\omega_3 = 149$ рад/с	$t_3 - t_4 = t_4 - t_5 = 4$ с
$\vartheta_4 = 12,5$ м/с	$\omega_4 = 255$ рад/с	$t_5 - t_6 = 2$ с

Для расчета сигнала управления необходимо задаться значениями ускорения при разгоне и торможении, а также длительностью интервалов разгона, установившегося режима работы и торможения. Допустим, что электробус разгоняется и тормозит с постоянным ускорением $a = 1,5$ м/с².

Обеспечение выдержек времени в алгоритме будет реализовано через пустые вложенные циклы. Поскольку микроконтроллер работает с тактовой частотой 1 МГц, то если задать в цикле 50000 итераций, выдержка составит 0,2 с. Таким образом, для выдержки времени разгона $0 \dots t_2$ потребуется 110 циклов по 0,2 с, для выдержки времени выбега $t_2 \dots t_3$ необходимо 50 циклов, для выдержки времени торможения и дотягивания $t_3 \dots t_4$, $t_4 \dots t_5$ потребуется 20 циклов, для выдержки времени остановки необходимо 10 циклов.

В алгоритме, представленном на рис. 2, происходит ввод и объявление переменных и АЦП, инициализация устройств ввода и вывода через интерфейсы, ввод сигналов с датчиков для реализации векторного управления. Затем задаются циклы разгона, выдержек интервалов времени и торможения. Каждый из таких циклов включает запись переменной с присвоенным ей значением, её инкрементацию либо декрементацию и блок сравнения с заданным числом. В зависимости от исхода сравнения происходит либо возврат к началу цикла, либо переход к следующему циклу. По окончании циклов осуществляется вывод переменных через параллельный порт для формирования сигналов на автономный инвертор напряжения (АИН). После циклов разгона, торможения и выдержек времени происходит проверка нажатия на педали акселератора и тормоза водителем. В случае воздействия водителем на педаль хода начинается цикл разгона электропривода, а в случае нажатия на педаль тормоза – его торможение. При отсутствии влияния водителем на цикл алгоритм повторяется, начиная со

значение. Следовательно, основное время, затрачиваемое на обработку отверстия, будет равно

$$T_o = \sum T_{oi}, \quad (3)$$

где T_{oi} – основное время i -го рабочего хода, с.

Основное время i -го рабочего хода

$$T_{oi} = \frac{L_{pi}}{S_m}, \quad (4)$$

где S_m – минутная подача, мм/мин.

Количество витков N определяется следующим образом:

$$N = \frac{L}{h}, \quad (5)$$

где L – длина отверстия, мм.

Согласно режимам резания при ВСО фрезерованием отверстия методом винтовой интерполяции шаг интерполяции h должен быть меньше или равен максимально допустимой глубине резания в осевом направлении для выбранного инструмента [1].

Основное время при фрезеровании отверстия методом круговой интерполяции определяется по формуле (3), однако для каждого i -го рабочего хода является суммой времени, затраченного на прохождение фрезой траектории по окружности, и времени, затраченного на осевое перемещение фрезы:

$$T_{o2i} = \left(\frac{L_{p.k.i} + L_{p.p.i} + L_{p.o.}}{S_m} \right) \cdot g, \quad (6)$$

где $L_{p.k.i}$ – длина рабочего хода центра инструмента по i -й окружности, мм; $L_{p.o.}$ – длина рабочего хода инструмента в направлении осевой подачи, мм; $L_{p.p.i}$ – длина рабочего хода инструмента в направлении i -й радиальной подачи, мм; g – количество холостых ходов в осевом направлении,

$$g = \frac{L}{L_{p.o.}}. \quad (7)$$

Длина рабочего хода центра инструмента $L_{p.k.i}$ по i -й окружности рассчитывается следующим образом:

$$L_{p.k.i} = \pi \cdot D_{\text{фр}}. \quad (8)$$

Длина рабочего хода инструмента $L_{p.o.}$ в направлении осевой подачи должна быть меньше или равна максимально допустимой глубине фрезерования в осевом направлении для выбранного инструмента.

Длину рабочего хода инструмента $L_{p.p.i}$ в направлении i -й радиальной подачи определяют по формуле

$$L_{p.p.i} = \frac{D_{mi} - DC}{2} . \quad (9)$$

При фрезеровании дна отверстия необходимо рассчитать длину рабочего хода фрезы. Для этого следует рассмотреть траекторию перемещения фрезы. Согласно рис. 1 при снятии припуска фреза перемещается по спиральной траектории с равномерным шагом. Такая траектория называется спиралью Архимеда. Однако спираль Архимеда (рис. 2) отличается от представленной на рис. 1.

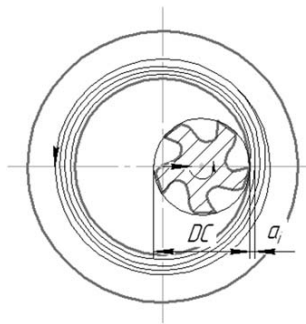


Рис. 1. Траектория движения фрезы при обработке дна ступенчатого отверстия

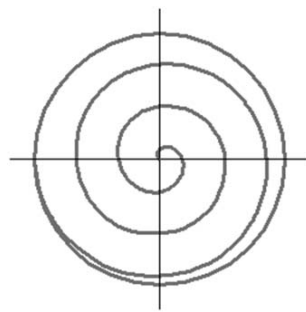


Рис. 2. Спираль Архимеда

Уравнение спирали Архимеда (см. рис. 2) имеет вид

$$r = k \cdot \varphi, \quad (10)$$

где φ – угол поворота спирали; k – коэффициент пропорциональности,

$$k = \frac{a}{2 \cdot \pi} ; \quad (11)$$

транспортного средства, обеспечения минимального и максимального ускорений и диапазона регулирования скорости целесообразно использовать замкнутую систему управления пуском и торможением с частотным регулируемым управлением. С учётом того, что управляемой координатой является крутящий момент, возникает необходимость использования векторного частотного управления, которое позволяет получить требуемые динамические свойства при регулировании скорости вверх от основной путём ослабления магнитного потока Φ . Такая система предполагает двухзонное регулирование скорости электропривода. Для изменения вращательного момента необходимо регулировать ток статора i_1 и потокосцепление ротора Ψ_2 двигателя, напряжения U_1 и частоту питающей сети f_1 [2].

Исходя из этого, актуальной целью исследования является проектирование микропроцессорной системы управления тяговым электроприводом, которая должна обеспечивать как перемещение электробуса по заранее заданному маршруту на основании разработанного алгоритма движения, так и реализацию векторного управления асинхронным двигателем. Достижение поставленной цели возможно при решении следующих задач:

- определение заданного маршрута движения электробуса;
- составление алгоритма работы тягового электропривода с учётом выполнения маршрута движения и реализации векторного управления;
- выбор микропроцессорного устройства для выполнения алгоритма функционирования тягового электропривода и среды разработки программы управления.

Определение цикла движения. Зададимся параметрами планируемого маршрута, который представляет собой цикл из 10 участков движения электробуса между остановочными пунктами. Каждый участок представляет собой отрезок протяжённостью 500 м. Характер движения имеет следующий вид (рис. 1): разгон с начальной скорости до номинальной скорости $\vartheta_{ном}$ за время t_1 ; движение со скоростью выше номинальной до значения ϑ_4 с ослаблением магнитного поля за время $t_1...t_2$; выбег до скорости выбега ϑ_3 за время $t_2...t_3$; торможение после выбега до маневровой скорости ϑ_2 за время $t_3...t_4$; дотягивание до скорости ϑ_1 за время $t_4...t_5$; торможение до полной остановки, остановка в течение 15 с.

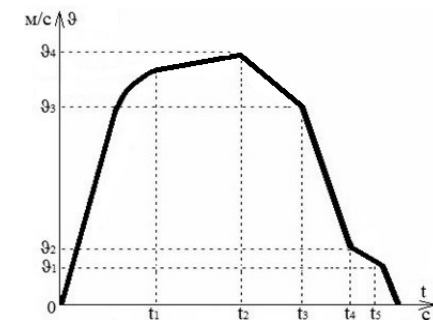


Рис. 1. Скоростная диаграмма движения электробуса по маршруту

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РОБОТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОБУСА

Аннотация

Рассмотрен вопрос проектирования микропроцессорной системы управления тяговым электроприводом роботизированного электробуса на основе составления алгоритма программы управления по заранее запланированному маршруту движения в городском цикле. В качестве устройства программной реализации был выбран микропроцессорный модуль на основе микроконтроллера TMS320F28035. Составленный алгоритм позволяет осуществить как регулирование скорости электропривода в соответствии с выдержкой интервалов времени, так и реализовать векторное управление тяговым электроприводом, а также допускает возможность вмешательства водителя в процесс управления.

Ключевые слова:

микропроцессор, микроконтроллер, асинхронный электродвигатель, тяговый электродвигатель, электробус, роботизированный электробус, среда разработки.

Введение. Несмотря на то, что электробус считается инновационным видом городского пассажирского транспорта, массовая эксплуатация которого началась относительно недавно, ведущие автопроизводители продолжают поиски способов усовершенствования конструкции и систем управления этим видом транспорта. Одним из перспективных направлений в данной отрасли является концепция роботизированного беспилотного электробуса, способного передвигаться по маршруту автономно, без участия водителя [1, с. 29]. Разработками в этой области занимались швейцарская компания Rinspeed и американская фирма Local Motors, которые представили опытные образцы автономных электробусов пассажироместимостью до 8 чел., способных автономно передвигаться по заданным маршрутам. Компания Tesla в 2022 г. анонсировала создание электробуса с функцией автономного управления Full-Self Drive, который находится в стадии тестирования. Однако на сегодняшний день массового серийно выпускаемого роботизированного беспилотного электробуса не представлено, в связи с чем данная тема представляет особую актуальность для исследования в области машиностроения.

Анализ режимов работы электробуса, как и других транспортных средств, показывает, что необходимой для регулирования выходной координатой является скорость его движения. Поскольку ведущая ось приводится в движение тяговым асинхронным электроприводом, то возникает потребность в изменении частоты вращения электродвигателя во всём диапазоне регулирования скорости электробуса. Кроме того, необходимо изменение тягового усилия электробуса для преодоления сопротивления силы трения и воздуха, а также подъёмов и иных внешних сил.

В связи с этим возникает потребность регулирования вращательного момента на валу тягового электропривода. Заданному моменту на механической характеристике электропривода будет соответствовать определенная скорость движения электробуса. В целях обеспечения плавности разгона и торможения

a – шаг спирали.

В рассматриваемом случае (см. рис. 1) обработка начинается на некотором расстоянии от центра координат, равном

$$r_1 = \frac{D_1}{2}, \quad (12)$$

где D_1 – начальный диаметр отверстия, подлежащего обработке.

Тогда для рис. 1 формула траектории имеет вид

$$r = r_1 + k \cdot \varphi. \quad (13)$$

Длина одного витка архимедовой спирали

$$L_{p.s} = \frac{1}{2} \cdot \left[(r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k) + \sqrt{k^2 + (r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k)^2} + \right. \\ \left. + k \cdot \ln \left[(r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k) + \sqrt{k^2 + (r_1 + 2 \cdot \pi \cdot k)^2} \right] \right]. \quad (14)$$

Для траектории, представленной на рис. 1, $a = a_i = a_{ei}$ (где a_{ei} – припуск в радиальном направлении, снимаемый за один виток). Один виток спирали равен 2φ . Количество витков спирали находится по формуле

$$N_{\partial.o.} = \frac{D - D_1}{2 \cdot a_{ei}}, \quad (15)$$

где D – диаметр получаемого отверстия на i -м рабочем ходе, мм; D_1 – начальный диаметр отверстия.

Тогда длина рабочего хода фрезы при обработке дна отверстия (см. рис. 1) будет равна

$$L_p = N_{\partial.o.} \cdot L_{p.s}. \quad (16)$$

Формулы (1)–(16) были применены для отверстия диаметром 70 мм с длиной поверхности, равной 30 мм, изготавливаемого по 8-му качеству точности и имеющего шероховатость 2,5 мкм по критерию r_a .

Условие для выбора инструмента [2]

$$D_\phi = \frac{D_o}{2} = \frac{38}{2} = 19 \text{ мм.}$$

Для рассматриваемого примера в соответствии с каталогом [1] выбрана концевая фреза 2F342-2000-200-PC 1730 со следующими параметрами: $D_\phi = 20$ мм, $z = 5$, $a_p = 42$ мм, $n_{\max} = 11700 \text{ мин}^{-1}$.

Частота вращения шпинделя для черновой обработки $n_{\text{черн}} = 9500 \text{ мин}^{-1}$, для чистовой – $n_{\text{чист}} = 11700 \text{ мин}^{-1}$. Глубина резания в радиальном направлении на

сторону за один рабочий ход $t_e = 10 \% \cdot D_\phi = 2$ мм, а на диаметр – $2 \cdot t_e = 4$ мм. Глубина фрезерования в осевом направлении для круговой интерполяции $l_{p.o.} = 30$ мм [1], для винтовой – шаг $h = 30$ мм [1]. Количество рабочих ходов в осевом направлении для круговой g и винтовой N интерполяций – 1.

Наиболее оптимальные режимы резания отверстия $D = 70$ мм, $L = 30$ мм (табл. 1) были определены в соответствии с [2, 3].

Табл. 1. Оптимальные режимы резания

Параметр	Черновой рабочий ход	Чистовой рабочий ход
Скорость резания V , м/мин	596,6	734,76
Подача на зуб F_z , мм	0,2	0,1
Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	9500	11700
Минутная подача на обрабатываемом диаметре S_M , мм/мин	9500	5850
Минутная подача у центра инструмента $S_{ЦМ}$, мм/мин	6706	4179
Глубина фрезерования в радиальном направлении на сторону a_e , мм	2	1
Количество рабочих ходов в радиальном направлении	8	1
Старт обработанного диаметра D_n , мм	38	68
Конец обработанного диаметра D_k , мм	68	70
Мощность резания P , кВт	1,25	0,94

Заклучение. В результате проведенных экспериментов было установлено, что при высокоскоростной обработке отверстия диаметром $D = 70$ мм и длиной $L = 30$ мм использование метода винтовой интерполяции оказывается более эффективным, чем круговой, в связи с тем, что общее время, затраченное на винтовую интерполяцию, составило $T_{ov} = 10,630$ с, в то время как для круговой интерполяции время $T_{ok} = 14,506$ с (табл. 2 и 3). Также была измерена общая работа, затраченная на обработку, которая составила $A_e = 12,576$ кДж (для винтовой интерполяции) и $A_k = 17,189$ кДж (для круговой).

Табл. 2. Основное время T_o и работа A , затрачиваемые при винтовой интерполяции

N	D_i , мм	$D_{цi}$, мм	L_{pi} , мм	T_o , с	$T_{ov} = \sum T_o$, с	A_i , кДж	$A_e = \sum A_i$, кДж
1	42	22	75,31	0,674	10,630	0,842	12,576
	46	26	86,98	0,778		0,973	
	50	30	98,86	0,885		1,106	
	54	34	110,89	0,992		1,240	
	58	38	123,03	1,101		1,376	
	62	42	135,25	1,210		1,513	
	66	46	147,52	1,320		1,650	
	68	48	153,68	1,375		1,719	
	70	50	159,84	2,295		2,157	

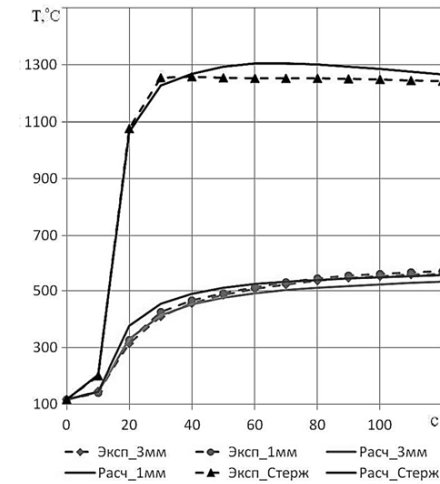


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения температур в результате адаптации математической модели к реальным условиям процесса литья

Таким образом, разработанная методика позволила адаптировать математическую модель к реальным условиям процесса литья детали «Вкладыш отбойный» с высокой точностью. Разработанное программное обеспечение использовано для проведения исследований по определению параметров внутреннего холодильника.

Контакты:

pumpurva@itm.by (Пумпур Владимир Анатольевич);

lcti@yandex.by (Дувалов Павел Юрьевич);

slavanski.new@gmail.com (Андриенко Вячеслав Михайлович).

V. A. PUMPUR, P. Y. DUVALAU, V. M. ANDRYIENKA

METHODOLOGY OF PARAMETRIC IDENTIFICATION OF HEAT TRANSFER WHILE CASTING DETAIL OF CENTRIFUGAL CRUSHING AND GRINDING EQUIPMENT

Abstract

A technique for parametric identification of heat transfer during casting of a part of centrifugal crushing and grinding equipment a crushing plate is presented. The authors have developed a mathematical model of heat transfer when casting a part into a chill mold and the corresponding software. On the basis of the developed methodology, the mathematical model was adapted to real casting conditions with high accuracy.

Keywords:

wear-resistant chromium cast iron, cast iron casting, heat transfer, mathematical model, parametric identification, model adaptation.

где n – количество установленных термопар, $n = 2$; k – число измерений температур; $T_{2,j,pi}$ – расчетные значения температур в месте установки j -й термопары; $T_{2,j,ei}$ – измеренные значения температур в месте установки j -й термопары.

Критерий K включает в себя отклонения расчетных температур в месте установки термопар от их измеренных значений в соответствующие моменты времени. Решение задачи идентификации адаптивного параметра α_{42} осуществляли путем минимизации критерия K на основе метода наименьших квадратов и определяли в виде постоянных величин для каждой из установленных термопар. В результате параметрической идентификации определены средние значения коэффициента контактного теплообмена между боковой поверхностью кокиля и отливкой, которые находятся в диапазоне от 1590 до 1610 Вт/(м²·К). Минимум критерия (1) достигается при значении коэффициента контактного теплообмена $\alpha_{42} \approx 1600$ Вт/(м²·К).

Параметрическую идентификацию α_{45} проводили на основе ранее полученных экспериментальных данных о динамике температур в центре стержня, которые снималась заранее установленной термопарой. Идентификация α_{45} осуществлялась путем минимизации критерия K_c вида

$$K_c(\alpha_{45}) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{(T_{5,pi} - T_{5,yi})}{T_{5,yi}} \right)^2, \quad (2)$$

где $T_{5,pi}$ – расчетные значения температур в месте установки термопары; $T_{5,yi}$ – измеренные значения температур в месте установки термопары (в центре стержня).

Критерий (2) учитывает температуры, измеренные с интервалом 10 с в начальный период формирования отливки продолжительностью 120 с. Параметрическую идентификацию α_{45} проводили при фиксированном значении $\alpha_{42} = 1600$ Вт/(м²·К).

В результате минимизации критерия (2) определено среднее значение коэффициента контактного теплообмена α_{45} , равное 10500 Вт/(м²·К). При этом наибольшие относительные отклонения расчетных значений температур в центре стержня от измеренных составили около 4 %, что сопоставимо с погрешностями экспериментов.

На рис. 3 представлены графики, иллюстрирующие изменение расчетных (сплошные линии) и измеренных (штриховые) значений температур, полученные в результате адаптации математической модели теплообмена при литье с применением охлаждающего стержня с учетом этапа заливки расплава продолжительностью 14 с. Полученные результаты подтверждают высокую адекватность разработанной математической модели.

Табл. 3. Основное время T_o и работа A , затрачиваемые при круговой интерполяции

g	$L_{p.p.i}, \text{ мм}$	$D_i, \text{ мм}$	$D_{ii}, \text{ мм}$	$L_{p.k.i}, \text{ мм}$	$T_{oi}, \text{ с}$	$T_{o\kappa} = \Sigma T_o, \text{ с}$	$A_i, \text{ кДж}$	$A_{\kappa} = \Sigma A, \text{ кДж}$
1	11	42	22	69,08	0,985	14,506	1,231	17,189
	13	46	26	81,64	1,115		1,394	
	15	50	30	94,2	1,245		1,557	
	17	54	34	106,76	1,376		1,720	
	19	58	38	119,32	1,506		1,883	
	21	62	42	131,88	1,636		2,045	
	23	66	46	144,44	1,767		2,208	
	24	68	48	150,72	1,832		2,290	
	25	70	50	157	3,044		2,861	

Представленные выше исследования будут использованы для разработки условий выбора оптимального варианта обработки гладких и ступенчатых отверстий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог SANDVIK COROMANT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com.ru>. – Дата доступа: 19.01.2023.
2. Оленин, Л. Д. О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (BCO) / Л. Д. Оленин, Д. И. Очечкин // Изв. МГУ «МАМИ». – 2014. – № 3 (21). – С. 25–31.
3. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении / С. И. Богодухов, Р. М. Сулейманов, А. Д. Проскурин. – Москва: Инновационное машиностроение, 2021. – 640 с.: ил.

Контакты:
 klyaus.olya@yandex.by (Кляус Ольга Николаевна);
 bru_aa@mail.ru (Жолобов Александр Алексеевич).

O. N. KLYAUS, A. A. ZHOLOBOV

ON THE ISSUE OF CHOOSING THE OPTIMAL METHOD OF HIGH-SPEED HOLE MILLING

Abstract

The article considers the method of theoretical determination of the most effective method of high-speed processing of VSO holes by milling on the basis of a complex criterion – the main time T_o + work A .

Keywords:

high-speed milling, hole, milling cutter, circular interpolation, screw interpolation.

УДК [[669.15-194+669.275.055:669.25]:539.538](045)

М. Ю. КОДНЯНКО

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (Солигорск, Беларусь)

АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВА ВК6

Аннотация

Износ режущего инструмента проходческих и проходческо-очистных комбайнов – одна из основных и дорогостоящих причин остановки процесса добычи полезных ископаемых. Показано, что с увеличением твердости возрастает стойкость высоколегированных сталей к абразивному изнашиванию. Испытания образцов проводились на дисковой машине трения, схема и описание которой приведены в работе. Описана методика проведения испытаний стальных образцов. Проиллюстрированы зависимости линейной интенсивности изнашивания металлов от нагрузки. Приведена зависимость интенсивности изнашивания сплава ВК6 от содержания в деформируемой массе кварцевого песка.

Ключевые слова:

абразивное изнашивание, горная порода, давление, нагрузка, окислительное изнашивание, твердость.

Введение. Проходческо-очистной комбайн используется для проведения подготовительных работ: проходки горных выработок, разделки камер, а также выемки руды камерной системой. Комбайн осуществляет разрушение забоя, убирает из забоя отбитую горную массу, погружает ее в бункер-перегрузатель либо самоходный вагон. Также комбайн производит бурение шпуров.

Износ режущего инструмента проходческих и проходческо-очистных комбайнов – одна из основных и дорогостоящих причин остановки процесса добычи полезных ископаемых. При добыче, например, каменного угля, который имеет относительно невысокую твердость, необходимо заменить порядка около 3000 твердосплавных зубков в год. Рекомендуется по мере приближения от центра вращения дискового инструмента к краю устанавливать более износостойкие зубки.

Стойкость высоколегированных сталей к абразивному изнашиванию заметно увеличивается с увеличением твердости до 65...67 HRC. Похожий эффект по долговечности достигается при нанесении на изнашиваемую поверхность инструмента износостойкого покрытия на основе карбида вольфрама газопламенным методом [1].

В качестве образцов для испытаний использовались пластинки размерами 8 × 22 × 20 мм, изготовленные из сталей 65Г, 38MnB5, 110Г13Л, P6M5 и сплава ВК6, обладающие высоким сопротивлением к абразивному изнашиванию. Их механические характеристики приведены в табл. 1.

Испытуемый образец 1 устанавливался в держателе 2 дисковой машины трения, где приводился в контакт с расположенной на диске 3 массой калийной

и 7200 кг/м³ соответственно; удельная теплота кристаллизации – 265000 Дж/кг. Температура-ликвидус расплава составляла 1250 °С, а температура-солидус – 1200 °С. Начальная температура кокиля принималась равной 118 °С.

Коэффициент контактного теплообмена между отливкой и поверхностью крышки кокиля α_{41} принимался равным термической проводимости слоя краски, т. е. $\alpha_{41} = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коэффициент контактного теплообмена между отливкой и поверхностью днища кокиля α_{43} принимался равным термической проводимости слоя укладываемой на днище кремнеземной термостойкой ткани, т. е. $\alpha_{43} = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коэффициент конвективного теплообмена элементов кокиля с окружающей средой (воздухом) $\alpha_{oc} = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коэффициенты теплообмена α_{12} и α_{23} в контактных зонах стальных плит 1 и 3 и боковой стенки из серого чугуна 2 принимались равными 1000 Вт/(м² · К) (на основе результатов ранее проведенных исследований).

На втором этапе осуществлялась параметрическая идентификация теплообмена при литье плиты отбойной на основе поиска значений параметров контактного теплообмена между формирующейся отливкой и боковой поверхностью кокиля, а также между отливкой и поверхностью внутреннего холодильника (стержня), обеспечивающих минимум невязки расчетных и экспериментальных данных о температурах, снятых по показаниям термопар.

Для адаптации разработанной математической модели в качестве внутреннего холодильника был выбран стержень из стали Ст3 со следующими теплофизическими свойствами: теплопроводность – 50 Вт/(м · К); удельная теплоемкость – 490 Дж/(кг · К); плотность – 7850 кг/м³; температура плавления – 1300 °С.

Параметрическая идентификация математической модели теплообмена проводилась на основе показаний термопар, установленных в двух сечениях боковой стенки кокиля на расстоянии 1 и 3 мм от поверхности, контактирующей с формирующейся отливкой, на высоте, равной половине высоты отливки ($l_2/2$, см. рис. 2), а также термопары, установленной в центре стержня-охлаждителя на той же высоте.

На основе предварительных расчетов определено значение адаптивного параметра α_{42} для этапа заливки расплава в форму, которое составило около 300 Вт/(м² · К). Установлено также, что идентификацию параметра теплообмена α_{42} необходимо и достаточно провести для первых 100...120 с процесса литья, пока градиенты температур вблизи рабочей поверхности кокиля наиболее высокие.

Выполнена оценка среднего значения коэффициента контактного теплообмена α_{42} , которая проводилась по совокупности частных критериев идентификации путем свертывания их в глобальный критерий вида

$$K(\alpha_{42}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k \left(\frac{(T_{2,j,pi} - T_{2,j,yi})}{T_{2,j,yi}} \right)^2, \quad (1)$$

С учетом сделанных допущений математическая модель теплообмена при формировании отливки включает уравнения теплопроводности, заданные начальные и граничные условия.

Уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), i = \overline{1, 5},$$

где λ_i , c_i , ρ_i – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала соответственно для i -й расчетной области; T_i – температурное поле для i -й расчетной области (см. рис. 2).

Начальные условия перед заливкой расплава в кокиль

$$T_1|_{\tau=0} = T_3|_{\tau=0} = T_{\text{кок}}, T_2|_{\tau=0} = T_6, T_4|_{\tau=0} = T_{\text{зс}}, T_5|_{\tau=0} = T_{\text{ст}},$$

где $T_{\text{кок}}$ – начальная температура верхней и нижней плит кокиля; T_6 – начальная температура боковой стенки 2 кокиля; $T_{\text{зс}}$ – температура газообразной среды в кокиле перед и в процессе заливки расплава; $T_{\text{ст}}$ – температура стержня.

На поверхности боковой стенки кокиля принимались граничные условия третьего рода с постоянным коэффициентом контактного теплообмена α_{42} . На поверхности стержня принимались граничные условия третьего рода с разными значениями коэффициента контактного теплообмена α_{45} для условий контакта стержня с расплавом и с затвердевающей на нем коркой. В частности, указанные граничные условия вдоль оси OX имеют следующий вид:

– на границе контакта расплава (отливки) 4 и рабочей поверхности боковой стенки 2 кокиля при $x = d$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=d} = \alpha_{42} (T_4 - T_2); \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=d} = \alpha_{42} (T_4 - T_2);$$

– на границе контакта расплава (отливки) 4 и поверхности стержня 5 при $x = r_{\text{ст}}$

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=r_{\text{ст}}} = \alpha_{45} (T_4 - T_5); \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=r_{\text{ст}}} = \alpha_{45} (T_4 - T_5),$$

где $r_{\text{ст}}$ – половина толщины или радиус стержня.

Тепловыделение при кристаллизации сплава хромистого чугуна учитывалось путем введения эффективной теплоемкости двухфазной зоны.

Принималось, что материал отливки (ИЧХ) имеет следующие теплофизические свойства: теплопроводность в жидком состоянии – 25 Вт/(м·К), в твердом состоянии – 12 Вт/(м·К); удельная теплоемкость в жидком и твердом состоянии – 850 и 520 Дж/(кг·К); плотность в жидком и твердом состоянии – 7000

руды 4 с содержанием 0; 5; 20; 55; 78 и 100 масс. % кварцевого песка (рис. 1). Твердость кварцевого песка – 7 из 10 по шкале Мооса.

Табл. 1. Механические характеристики металлов

Металл	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	HRC (HB), МПа
Сталь 65Г	980	785	45 (420)
Сталь 38MnB5	1150	900	47 (450)
Сталь 110Г13Л	850	340	56 (550)
Сталь Р6М5	3400	637	63 (640)
Сплав ВК6	1500		71 (780)

Примечание – Сталь 110Г13Л не является износостойкой, но она подвергалась испытаниям, т. к. в процессе трения ее тонкий поверхностный слой наклепывался и приобретал высокое сопротивление абразивному изнашиванию

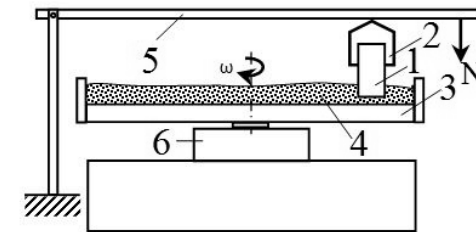


Рис. 1. Схема нагружения образцов на дисковой машине трения: N – нормальная нагрузка; ω – угловая скорость

Средний размер абразивных частиц до начала испытаний – порядка 80 мкм. Нагрузка на образец задавалась сменными грузами, установленными на рычаг 5. Площадь поверхности трения образцов – $1,6 \cdot 10^{-4}$ м²; скорость перемещения образца в массе калийной руды – 0,328 м/с. Скорость варьировалась при помощи редуктора 6 и путем изменения расстояния от оси вращения диска до образца. Испытания длились 4 ч.

Линейная интенсивность I_h металлов находится из выражения

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho A_a L}, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы, кг; ρ – плотность изнашиваемого материала, кг/м³; A_a – площадь поверхности трения образцов, м²; L – путь трения, м.

Изначально испытания проводилась при трении образцов из стали 65Г, 110Г13Л, 38MnB5 и стали Р6М5 по кварцевому песку, содержащему 100 масс. %

кварца. Повышение номинального контактного давления сопровождалось незначительным увеличением интенсивности изнашивания всех металлов, подлежащих исследованиям (рис. 2). Это обусловлено ростом глубины внедрения частиц песка кварца и размеров оставляемых ими углублений на поверхности металла. В области высоких давлений зависимость становится менее существенной. Это объясняется тем, что с ростом контактного давления пространство между образцом и диском становится меньше, возможность попадания крупных абразивных частиц в зону контакта становится меньше. Падает общее количество абразивных частиц, находящихся во взаимодействии с металлом. В итоге интенсивность изнашивания будет определяться конкуренцией двух факторов: глубиной бороздок, образовавшихся за внедрившимися скользящими частицами, и количеством этих бороздок.

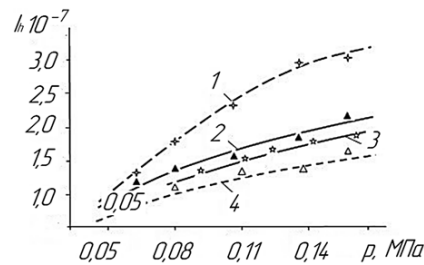


Рис. 2. Зависимости линейной интенсивности изнашивания металлов от нагрузки: 1 — сталь 65Г; 2 — 38МнБ5; 3 — 110Г13Л; 4 — Р6М5

На рис. 2 показано, что более интенсивно изнашивается сталь 65Г, а это свидетельствует о том, что такая сталь обладает самой низкой твердостью — 45 HRC. Самое низкое значение интенсивности изнашивания присуще стали Р6М5, в состав которой входит вольфрам, твердость такой стали — 63 HRC.

С увеличением твердости металла его износостойкость растет, объем интенсивно деформируемого материала становится меньше. Уменьшается также интенсивность усталостного изнашивания.

Процесс изнашивания сплава ВК6 не менее интересен, чем у сталей, поскольку его твердость практически равна твердости кварцевого песка, и есть вероятность отсутствия абразивного изнашивания. В этом случае важно оценить виды других механизмов изнашивания и их вклад в разрушение поверхности трения. Для хлорида калия и натрия она соответствует 2-му классу по шкале Мооса. Были проведены исследования процесса изнашивания сплава ВК6 при перемещении в деформируемой массе, содержащей 100 масс. % кварцевого песка. Исследования велись при нагрузках 2,5...10 МПа, что позволило обеспечить необходимую точность измерения потери массы образца за выбранный период испытаний.

В ходе проведения испытаний выяснилось, что зависимость линейной интенсивности изнашивания сплава ВК6 от номинального давления графически изображается кривой с минимумом (рис. 3). Незаметное снижение I_h связано с

Один из способов увеличения износостойкости детали по всей глубине — введение в центральную часть отливки внутреннего охлаждающего элемента (холодильника), который должен способствовать увеличению переохлаждения объема расплава, а также измельчению структуры отливок и улучшению механических свойств получаемого чугуна. Учитывая форму защитной детали и величину ее выработки, в качестве внутреннего холодильника принимали металлический стержень диаметром от 10 до 20 мм, который размещали в центральной части вдоль оси отливки.

С целью определения оптимальных размеров, формы и материала внутреннего холодильника применяли аппарат математического моделирования. На рис. 2 представлена схема к расчету теплообмена при литье отливки вкладыша отбойного 4 в кокиль, состоящий из элементов 1 (стальной верхней плиты), 2 (чугунной боковой стенки), 3 (стальной нижней плиты) с внутренним холодильником 5 в виде стержня.

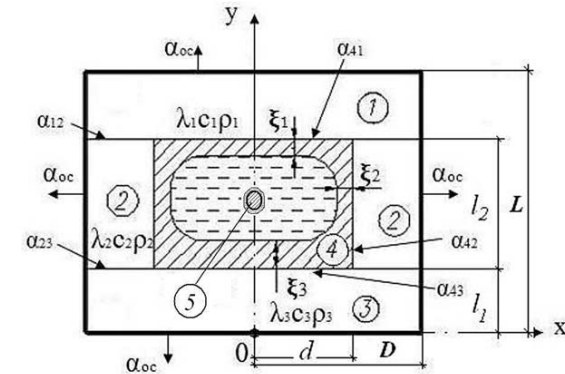


Рис. 2. Схема к расчету теплообмена при литье отливки в кокиль: d — половина толщины отливки; D — половина ширины конструкции кокиля по наружному обмеру; l_1 — толщина нижней плиты кокиля; l_2 — высота отливки; L — высота конструкции кокиля по наружному обмеру; ξ_1, ξ_2, ξ_3 — толщина затвердевшего металла на рабочих поверхностях элементов кокиля

На первом этапе исследований была разработана математическая модель, описывающая теплообмен формирующейся отливки с элементами кокиля и внутренним охлаждающим элементом при литье вкладыша отбойного. На границах расчетных областей принимались граничные условия третьего рода с постоянными коэффициентами контактного теплообмена. На внешних поверхностях кокиля принимались граничные условия третьего рода с постоянными коэффициентами конвективного теплообмена.

При моделировании процесса затвердевания учитывался этап заливки расплава в кокиль с учетом подъема расплава снизу вверх. На поверхности заливаемого расплава принимались граничные условия третьего рода с коэффициентом теплообмена, учитывающим лучистый и конвективный теплообмен.

В. А. ПУМПУР, канд. техн. наук, доц.

П. Ю. ДУВАЛОВ

В. М. АНДРИЕНКО

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЛИТЬЕ ДЕТАЛИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

Представлена методика параметрической идентификации теплообмена при литье детали центробежного дробильно-размольного оборудования «Вкладыш отбойный». Разработаны математическая модель теплообмена при литье детали в кокиль и соответствующее программное обеспечение. На основе созданной методики осуществлена адаптация математической модели к реальным условиям литья с высокой точностью.

Ключевые слова:

износостойкий хромистый чугун, литье чугуна, теплообмен, математическая модель, параметрическая идентификация, адаптация модели.

Для улучшения эксплуатационных свойств большинства защитных деталей центробежного дробильно-размольного оборудования и увеличения их срока службы важно обеспечить одинаково высокую скорость охлаждения отливок не только вблизи рабочей поверхности кристаллизатора, но и по всей глубине. К таким деталям относится, в частности, деталь из износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) «Вкладыш отбойный», которая вырабатывается в процессе дробления материалов до толщины в 20...24 мм по 10...12 мм с каждой из сторон (рис. 1).

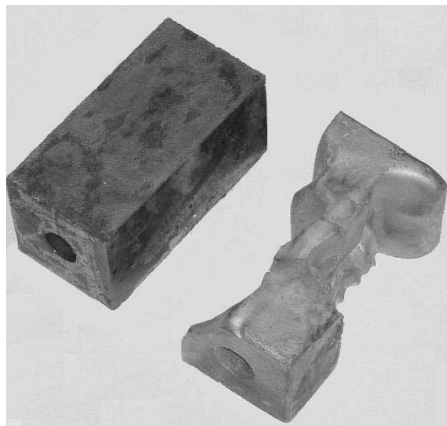


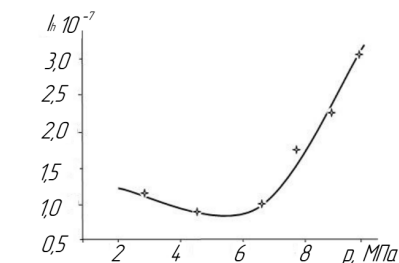
Рис. 1. Плита отбойная без выработки и с выработкой

уменьшением зазора и вероятности попадания частиц кварца в зону трения. Возрастание I_h при $p > 6$ МПа связано с повышением давления на контакте «частица – металл», сопровождающимся увеличением глубины внедрения частицы кварца и повышением температурной вспышки, достигающей сотен градусов, а при тяжелых режимах нагружения – точки плавления изнашиваемой

детали [2]. Импульсное повышение температуры приводит к снижению механических свойств кобальтовой связки и повышению ее химической активности.

При этом свойства частицы кварца практически не изменяются. Под действием первого механизма изнашивания происходит увеличение глубины внедрения частиц кварца в кобальтовую связку и повышение I_h сплава в целом. Этот фактор является определяющим при высокой концентрации абразива в горной породе.

Рис. 3. Зависимость линейной интенсивности изнашивания сплава ВК6 от нагрузки при $C_{кв} = 100$ масс. %



На поверхности трения сплава формируются неглубокие прерывистые бороздки, приводящие к абразивному изнашиванию. Разрушение и образование бороздок при трении в абразиве, происходящее по объему менее твердой кобальтовой связки, происходит из-за высокой твердости сплава. При этом данный процесс сопровождается удалением высокотвердых частиц карбида вольфрама.

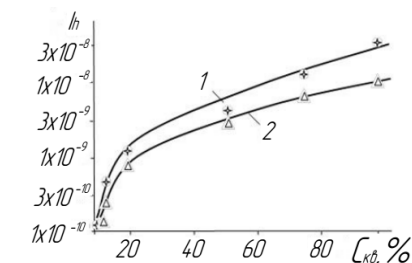


Рис. 4. Зависимости линейной интенсивности изнашивания сплава ВК6 от содержания кварцевого песка в деформируемой массе: 1 – $p = 4,8$ МПа; 2 – $p = 9,8$ МПа

При малом содержании абразива на поверхности трения абразивное разрушение вносит малый вклад в изнашивание, что приводит к многократному снижению I_h . Так, при изменении содержания абразива от 1 масс. % до 100 масс. % интенсивность изнашивания сплава повышается на два порядка (рис. 4). В интервале $C_{кв} = 1$ масс. %...15 масс. % зависимость $I_h(p)$ заметна более ярко и это свидетельствует о повышении химической активности карбида вольфрама и кобальта при увеличении температуры на пятнах контакта. Так, карбид вольфрама становится неустойчивым к воздействию хлора и активно окисляется при темпера-

туре, превышающей $T = 500$ °С, а кобальт – при достижении $T = 300$ °С. При такой температуре образуются насыщенные дефектами хрупкие оксидные пленки, которые легко разрушаются при малых нагрузках, т. е. начинается изнашивание. Подтверждением достижения высокой температуры не только на пятнах контакта, но и ее среднего по поверхности трения значения, являются известные эксплуа-

тационные испытания на врубовых баровых машинах производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (рис. 5). Так, в процессе резания мягкого и среднего угла была зафиксирована температура 300 °С...400 °С на расстоянии 0,05 мм от режущей кромки [3]. При $C_{кв} > 15$ масс. % интенсивность изнашивания сплава ВК6 в подавляющей степени определяется абразивным разрушением поверхности трения.

Для проходки компенсационных щелей используют щеленарезные машины, в частности, машины врубовые баровые МВБ-140, МВБ-140Э.

Машины врубовые баровые МВБ-140 и МВБ-140Э предназначены для нарезки компенсационных щелей под любым углом по периметру горизонтальных и наклонных (не более $\pm 15^\circ$) горных выработок высотой 2,6...3,0 м при сопротивляемости пород резанию до $A_p = 450$ Н/мм [4].



Рис. 5. Машина врубовая баровая производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»

При сравнении представленных данных (см. рис. 2 и 3) видно, что по сопротивлению изнашиванию вольфрамкобальтовый сплав на порядок превосходит высоколегированные стали, несмотря на то, что его истирание проводилось при номинальном контактном давлении, превосходящем в 30–60 раз номинальное давление в испытаниях сталей.

Выводы. Независимо от контактного давления доминирующим видом изнашивания легированных износостойких сталей в горной среде является малоцикловая усталость, о чем свидетельствует множество мелких бороздок, расположенных вдоль направления перемещения образца. Реализуется также усталостное изнашивание. Абразивное изнашивание сплава ВК6, протекающее по кобальтовой связке, становится доминирующим видом при концентрации абразивных частиц в горной породе выше 15 масс. %.

При номинальном давлении более 1 МПа на контакте сплава ВК6 с горной породой и малом (до 15 масс. %) содержании в ее объеме частиц оксида кремния вклад окислительного и абразивного изнашивания в суммарный износ сплава становится соизмеримым. Повышение роли окислительного изнашивания обусловлено влиянием температуры на пятна контакта на скорость окисления компонентов сплава [5].

A. V. POPRUKAYLO, G. A. KOSTYUKOVICH, M. E. KIPNIS, E. V. OVCHINNIKOV, D. S. KALYNOV

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY FOR THE FORMATION OF ANTIFRICTION POLYMER COATINGS FOR PARTS OF SPLINED JOINTS OF CARDAN TRANSMISSIONS

Abstract

An important design feature of cardan transmissions is the presence of a splined connection. The spline connection is designed to compensate for changes in the length of the cardan transmission during its operation; it is the element that has the largest gaps and loads in the friction pair due to the action of torque and axial forces, and largely determines the durability of the cardan transmission. These forces in vehicle transmissions in difficult driving conditions reach 50 kN. One of the methods for increasing the durability of friction pairs is the use of antifriction coatings. At the same time, axial forces are reduced by 5 times, which increases the service life of gearbox and drive axle bearings by more than 2–3 times, as well as the wear resistance of the movable spline joints themselves. The technology for applying antifriction polymer coatings is quite complex and requires the use of special equipment, special surface preparation methods and precise adherence to temperature conditions.

The article presents an analysis of the technology for forming an antifriction polymer coating on the parts of splined joints of cardan transmissions. It is shown that the use of an installation for applying a polymer coating in a fluidized bed, developed and put into production by JSC "Belcard", Grodno, makes it possible to optimize the technology for applying a polymer coating to splined bushings of cardan transmissions, significantly increase the stability and productivity of the process, and improve the quality and working conditions.

Keywords:

cardan transmission, spline connection, spline bushing, anti-friction coating, fluidized bed, coating technology, coating installation.

постоянное количество полимерного порошка 14 в рабочей емкости 13, чем достигается стабильность глубины погружения шлицевых втулок 1 в псевдооживленный слой.

Переналадка установки для нанесения полимерного покрытия на шлицевые втулки различной номенклатуры выполняется за счёт установки на многоместную планшайбу 4 соответствующих сменных элементов 3, которые крепятся быстродействующими зажимами 6. Управляющее устройство 8 обеспечивает точное позиционирование шлицевой втулки 1 при её опускании в псевдооживленный слой полимерного порошка 14 и время нахождения детали в зоне контакта с полимерным порошком.

Заключение. Внедрение автоматизированной установки для нанесения антифрикционного полимерного покрытия на шлицевые втулки карданных передач позволило обеспечить стабильность процесса по длине покрытия поверхностей шлицевых втулок, точность толщины и равномерность наносимого покрытия до 50 мкм. Кроме того, улучшены условия труда персонала и повышена производительность выполнения операции по нанесению полимерного покрытия.

Разработанная конструкция автоматизированной установки для нанесения антифрикционного полимерного покрытия на шлицевые втулки карданных передач защищена патентом № 13054 Республики Беларусь и внедрена в производстве ОАО «Белкард» (г. Гродно).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кравченко, В. И.** Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 409 с.
2. **Малаховский, Я. Э.** Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденеев. – Москва: Машгиз, 1962. – 156 с.
3. **Беркер, А. Х.** Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 464 с.
4. **Иванов, С. Н.** Трансмиссионные валы нового поколения / С. Н. Иванов // Автомобильная промышленность. – 1998. – № 11. – С. 23–27.
5. **Иванов, С. Н.** Карданные передачи ведущих валов трансмиссий машин и систем (конструкция, теория, расчёт, испытания, эксплуатация, ремонт) / С. Н. Иванов. – Москва, 2014. – 232 с.
6. Установка для нанесения полимерного покрытия в псевдооживленном слое: пат. BY 13054 / Г. А. Костюкович, М. Е. Кипнис, А. В. Попрукайло. – Оpubл. 03.10.2022.

Контакты:
ogt@belcard-grodno.com (Попрукайло Александр Витальевич);
gsktb@belcard-grodno.com (Костюкович Геннадий Александрович);
maratkipnis@mail.ru (Кипнис Марат Ефимович);
ovchin_1967@mail.ru (Овчинников Евгений Витальевич);
vikon_v@mail.ru (Калынов Денис Сергеевич).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Басалай, И. А.** Применение карбидизации для повышения эксплуатационной стойкости деталей горного оборудования из высокохромистых сталей / И. А. Басалай, Л. Ф. Павловская // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В. Р. Кубачека» в рамках Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург: Урал. гос. горный ун-т, 2016. – С. 323–326.
2. **Bogdanovich, P. N.** Temperature fields in a high-speed friction contact / P. N. Bogdanovich, D. V. Tkachuk // Tribologia. – 2004. – Vol. 193, № 1. – P. 75–90.
3. **Виноградов, В. И.** Изнашивание в твердосплавной вставке буровой коронки / В. И. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 3. – С. 84–90.
4. **Тройнич, В. А.** Проектирование и эксплуатация горно-шахтного оборудования для нарезки компенсационных щелей / В. А. Тройнич, Д. В. Гридюшко // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоцкого гос. ун-та имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. – Новополоцк: ПГУ, 2023. – С. 184–186.
5. **Богданович, П. Н.** Изнашивание легированных сталей и сплава ВК6 абразивными частицами / П. Н. Богданович, В. М. Станкевич, М. Ю. Коднянко // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 3. – С. 71–77.

Контакты:
onti@sipr.by (Коднянко Максим Юрьевич).

M. YU. KADNIANKA

ABRASIVE WEAR OF ALLOY STEELS AND ALLOY VK6

Abstract

Wear of the cutting tools of tunneling and roadheaders is one of the main and expensive reasons for stopping the mining process. It has been shown that with increasing hardness, the resistance of high-alloy steels to abrasive wear increases. The samples were tested on a disk friction machine, the diagram and description of which are given in this work. The methodology for testing steel samples is described. The dependences of the linear wear rate of metals on the load are illustrated. The dependence of the wear rate of the VK6 alloy on the content of quartz sand in the deformable mass is presented.

Keywords:

abrasive wear, rock, pressure, load, oxidative wear, hardness.

УДК 681.5.015

*М. М. КОЖЕВНИКОВ, канд. техн. наук, доц.**О. Б. ГАНАК*Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
(Могилев, Беларусь)**МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОМПОНОВОК РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****Аннотация**

Исследованы задачи автоматизированного проектирования компоновок для робототехнических систем, используемых в машиностроении. Предложены методы и критерии для поиска рациональной компоновки с минимальным временем цикла работы робототехнической системы.

Ключевые слова:

робототехническая система, автоматизированное проектирование, компоновка.

При проектировании робототехнической системы возникают задачи, связанные с созданием компоновочных чертежей, отражающих взаимное размещение роботов-манипуляторов, технологического оборудования и оснастки. Возможны разнообразные варианты таких компоновок, однако при этом наиболее важно рационально разместить робот-манипулятор относительно оборудования. Важно отметить, что правильный выбор положения базы робота существенно влияет на гибкость и производительность робототехнической системы в целом.

При создании компоновок робототехнических систем средствами автоматизированного проектирования решается задача выбора некоторого варианта компоновки из множества возможных на основе заданного критерия качества. При этом технологический инструмент должен иметь беспрепятственный доступ к оборудованию, а движения робота должны формироваться с учетом конструктивных и кинематических ограничений. К наиболее распространенным критериям оценки качества компоновки относят объем движений робота, отсутствие столкновений, время цикла. В [1, 2] указывается, что, например, компоновочная схема робототехнической системы, улучшенная минимизацией критерия времени цикла, позволяет существенно снизить это время в сравнении с традиционными подходами. Следует также отметить, что использование рациональной компоновки робототехнической системы позволяет улучшить качество траекторий и упростить программирование робота-манипулятора.

В мелкосерийном производстве робототехническая система работает в следующей последовательности: захват заготовки роботом-манипулятором и ее перемещение между единицами оборудования в соответствии с технологическим процессом, перемещение робота-манипулятора в исходное положение. Цикл многократно повторяется, соответственно сокращение его общего времени позволяет увеличить пропускную способность роботизированной системы в целом. При этом на общее время цикла будут влиять такие факторы, как порядок

коммутационную пневмо- и электросеть. При этом детали, подвергаемые покрытию, на исходных позициях расположены по кругу на сменных элементах и в зону контакта с полимерным порошком поступают автоматически на заданный промежуток времени, а в рабочей емкости обеспечен постоянный уровень псевдооживленного полимерного порошка [6].

Детали, подвергаемые покрытию, на исходных позициях расположены по кругу, чем достигается компактность установки, при этом обеспечена возможность переналадки установки за счёт сменных элементов многоместной планшайбы, что позволяет выполнять покрытие шлицевых втулок различной номенклатуры. В зону контакта с полимерным порошком шлицевые втулки поступают автоматически на заданный промежуток времени, за счёт чего повышена точность глубины погружения детали в псевдооживленный слой, что обеспечивает стабильность длины поверхностей детали, покрываемых полимером, а также равномерность и точность по толщине слоя полимерного покрытия. Конструкция заправочной ёмкости обеспечивает постоянный уровень псевдооживленного слоя полимерного порошка в рабочей ёмкости. Кроме того, установка улучшает условия труда персонала, повышает стабильность процесса и производительность выполнения операции по нанесению полимерного покрытия.

Шлицевые втулки 1 устанавливаются в сменные элементы 3, которые крепятся на многоместной планшайбе 4. Многоместная планшайба 4 вместе со втулками 1 вращается на оси 5 мотор-редуктором 9. Полимерный порошок 14 в псевдооживленном состоянии находится в рабочей емкости 13, которая соединена с подающим пневмоцилиндром 10. При вращении планшайбы 4 в момент, когда ось 2 шлицевой втулки 1 совпадает с осью 11 рабочей емкости 13, вращение многоместной планшайбы 4 прекращается, подающий пневмоцилиндр 10 поднимает рабочую емкость 13 на заданную высоту. Шлицевая втулка 1 попадает в зону контакта с полимерным порошком 14 на заданный промежуток времени, в течение которого происходит наплавление полимерного порошка 14 на поверхности шлицевой втулки 1, погруженные в псевдооживленный слой. По истечении заданного промежутка времени подающий пневмоцилиндр 10 опускает рабочую емкость 13 в исходное положение, многоместная планшайба 4 поворачивается на заданный угол и цикл нанесения полимерного покрытия повторяется для следующей детали. Коммутационная пневмо- и электросеть 7 обеспечивает связь управляющего устройства 8 с мотор-редуктором 9 и подающим пневмоцилиндром 10. Управляющее устройство 8 позволяет регулировать угол поворота планшайбы 4, высоту подъёма рабочей емкости 13 и время нахождения шлицевой втулки 1 в псевдооживленном слое полимерного порошка 14. Рабочая емкость 13 располагается в заправочном резервуаре 12, в котором поддерживается постоянный уровень 16 полимерного порошка 14. В нижнем положении рабочей емкости 13 её верхняя кромка 15 опускается ниже уровня 16. За счёт этого при каждом цикле происходит пополнение рабочей емкости 13 полимерным порошком 14 из заправочного резервуара 12. В результате в процессе работы установки обеспечивается

Недостатком таких установок является то, что для размещения полимерного порошка необходима ёмкость большого объёма, требующая постоянного пополнения для поддержания требуемого уровня псевдооживленного слоя полимерного порошка, установка занимает большие производственные площади и требует значительного количества обслуживающего персонала. Кроме того, навеска деталей на конвейер нетехнологична, поскольку связана с необходимостью применения большой номенклатуры дополнительной оснастки для закрепления и подвески деталей, что приводит к увеличению трудоёмкости.

С целью улучшения качества нанесения полимерного покрытия на шлицевую втулку, улучшения условий труда персонала, повышения производительности выполнения операции по нанесению полимерного покрытия, снижения трудоёмкости, исключения операции по закреплению деталей при подвеске и дополнительной оснастки в ОАО «Белкард» (г. Гродно) была разработана и внедрена автоматизированная установка для нанесения антифрикционного полимерного покрытия на шлицевые втулки карданных передач (рис. 4).

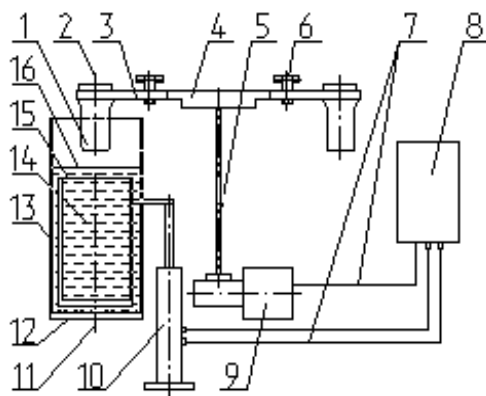


Рис. 4. Схема автоматизированной установки для нанесения антифрикционного полимерного покрытия на шлицевые втулки карданных передач: 1 – шлицевая втулка, подвергаемая полимерному покрытию; 2 – ось шлицевой втулки; 3 – сменный элемент; 4 – многоместная планшайба; 5 – ось; 6 – быстродействующий зажим; 7 – электросеть; 8 – управляющее устройство; 9 – мотор-редуктор; 10 – подающий пневмоцилиндр; 11 – ось рабочей ёмкости; 12 – заправочный резервуар; 13 – рабочая ёмкость; 14 – полимерный порошок; 15 – верхняя кромка рабочей ёмкости; 16 – постоянный уровень полимерного порошка

Установка для нанесения полимерного покрытия в псевдооживленном слое содержит многоместную планшайбу с быстродействующими зажимами и сменными элементами для установки шлицевых втулок, мотор-редуктор привода многоместной планшайбы, рабочую ёмкость и заправочный резервуар с полимерным порошком, подающий пневмоцилиндр, управляющее устройство,

обхода технологического оборудования роботом и протяженность промежуточных участков траекторий между оборудованием, и, соответственно, положение базы робота. Это положение необходимо определить на этапе создания компоновки роботизированной системы.

Известные подходы к проектированию компоновки роботизированной системы, обзор которых можно найти в [2], основаны на ориентировочном определении координат базы робота-манипулятора с применением метода «рабочая оболочка». Такой метод основан на тестировании перекрытия рабочих зон технологического оборудования и «рабочей оболочки» робота-манипулятора и при определенном размещении его базы. Если ряд единиц технологического оборудования не доступны, положение базы робота меняется за счет ее линейных смещений. Положение базы робота корректируется до тех пор, пока все рабочие зоны оборудования не будут перекрыты областью «рабочей оболочки». Этот упрощенный подход рассматривает только вопрос достижимости технологического оборудования без оценки общего времени цикла.

Задачи снижения времени цикла за счет выбора рационального положения базы манипулятора относительно оборудования рассматриваются в ряде известных работ [1–4]. В частности, методика, описанная в [1], основана на формировании некоторого множества возможных положений базы манипулятора. Для каждого такого дискретного положения вычисляется время цикла на основе решения задачи коммивояжера, а затем выбирается вариант с минимальным временем. В [2] алгоритм моделируемого отжига обеспечивает как минимизацию времени цикла изменением размещения базы робота, так и поиск рациональной последовательности движений захватного устройства. Первоначально осуществляется поиск вариантов компоновок, удовлетворяющих тесту столкновений и условиям достижимости оборудования. Затем производится поиск варианта компоновки, на которой время цикла минимально на основе эвристических методов. В [3] разработана методика поиска рационального положения робота-манипулятора относительно оборудования с минимизацией времени цикла. В этой работе проведено экспериментальное исследование зависимости между временем цикла и взаимным положением оборудования и робота-манипулятора. На основе полученных экспериментальных зависимостей выполнен поиск координат базы робота, при которых время цикла минимально. Проведенные исследования показали, что по сравнению с компоновками, полученными традиционными методами, среднее время цикла можно снизить на 37 %.

Авторы [5] исследовали методику поиска рационального положения базы манипулятора в сложном рабочем пространстве с препятствиями. Качество компоновки робототехнической системы оценивалось по качеству траекторий, реализуемых технологическим инструментом на этой компоновке. Такой метод основан на том, что для каждого возможного положения базы манипулятора выполняется поиск допустимой траектории.

Аналогичная задача рассмотрена в [6]. Особенностью предлагаемой авторами этой работы методики является то, что при фиксированной рабочей

точке технологического инструмента ищется минимальное энергопотребление робота за счет изменения положения базы манипулятора.

В данной работе предложены новые методы и критерии для поиска рациональной компоновки с минимальным временем цикла работы робототехнической системы. Исходными данными при поиске рациональной компоновки робототехнической системы являются [7]: геометрические модели технологического инструмента, оборудования, геометрическая и кинематическая модели робота-манипулятора.

Поиск положения базы робота-манипулятора, при котором минимизируется некоторый критерий J , осуществляют путем последовательного повторения следующих шагов для каждого возможного положения базы:

- 1) проверка достижимости оборудования роботом-манипулятором;
 - 2) тестирование столкновений между оборудованием и роботом-манипулятором;
 - 3) оценка величины критерия качества J .
- Алгоритм вычислений приведен на рис. 1.

Алгоритм 1. Определение положения базы b оптимального по критерию времени цикла c	
1. $c \leftarrow \infty$	}
2. $b \leftarrow O$	}
3. для всех b_i	}
4. $c_i = J(b_i)$	}
5. если $c_i < c$ то	}
6. $c \leftarrow c_i$	}
7. $b \leftarrow b_i$	}
8. конец-если	}
9. конец-для-всех	}
10. вернуть b, c	}

Рис. 1. Алгоритм поиска положения базы робота

Недостатки такого алгоритма связаны с ростом объема вычислений по мере усложнения геометрической модели роботизированной системы, при этом алгоритм позволяет найти только одно из множества возможных решений. Поиск рационального положения робота-манипулятора может сводиться к поиску максимума функции $f(b)$, которая соответствует количеству свободных от столкновений траекторий, реализуемых роботом, где b – вектор, описывающий координаты базы робота. К функции $f(b)$ не предъявляются требования непрерывности и выпуклости вследствие наличия препятствий и кинематических ограничений.

В качестве дополнительного критерия введем функцию, характеризующую удаленность робота от оборудования. При приближении технологического инструмента к оборудованию значение этой функции возрастает. Функция таким

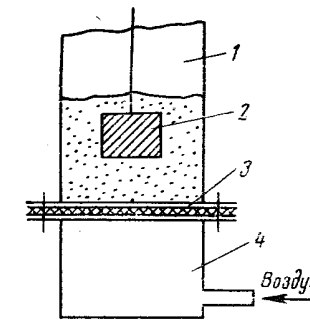


Рис. 2. Схема одноместной установки нанесения полимерного покрытия: 1 – камера рабочая; 2 – изделие; 3 – перегородка пористая; 4 – камера воздушная

Недостатком таких установок является то, что деталь в зону контакта с полимерным порошком индивидуально помещается вручную. При этом позиционирование детали и время её нахождения в псевдоожиженном слое контролируется оператором, что не позволяет обеспечить стабильность процесса по точности толщины и равномерности слоя полимерного покрытия. Кроме того, при выполнении операции по нанесению полимерного покрытия оператор, удерживая покрываемую деталь усилием руки, испытывает значительные физические нагрузки. Это приводит к повышенной утомляемости и ослаблению внимания к контролируемым параметрам процесса в течение смены, а также к снижению производительности выполнения операции.

Также применяются конвейерные установки для нанесения покрытия (рис. 3), у которых детали, подвергаемые полимерному покрытию, располагаются на подвесном конвейере и опускаются в емкость с псевдоожиженным полимерным порошком по мере продвижения конвейера [5].

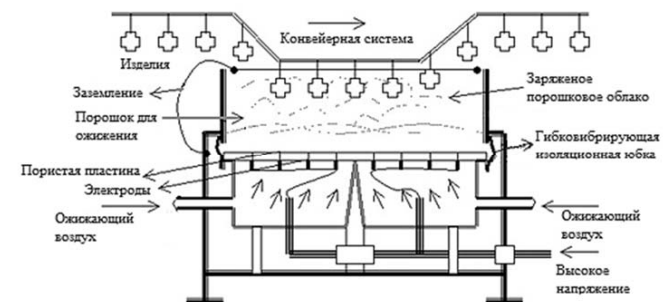


Рис. 3. Схема конвейерной установки для нанесения полимерного покрытия

соединяемых агрегатов и условиях работы водителя. Поэтому применяют различные способы обработки поверхностей шлицевых соединений, чтобы уменьшить осевые усилия, а также обеспечить защиту от коррозии [1–2].

В карданных передачах производства ОАО «Белкард» (г. Гродно) для снижения осевых усилий, возникающих при изменении длины карданной передачи, и увеличения срока службы на рабочие поверхности шлицевой втулки наносится полимерное покрытие на основе Полиамида 11, позволяющее снизить коэффициент трения в сопряжении. Полиамид 11 является одним из наиболее прочных термопластов, имеет хорошие антифрикционные свойства и износостойкость, стоек к воздействию влаги, масел и высоких температур, вызывающих искажение формы. Покрытие устраняет шум, возникающий при работе, и служит до некоторой степени демпфером возникающих колебаний.

Основная часть. Традиционно технологический процесс нанесения на детали шлицевого соединения карданных передач антифрикционного полимерного покрытия в псевдооживленном (кипящем) слое состоит из следующих операций: предварительная подготовка поверхностей шлицевой втулки, грунтовка, предварительный нагрев, погружение в псевдооживленный слой полимера (рис. 1).

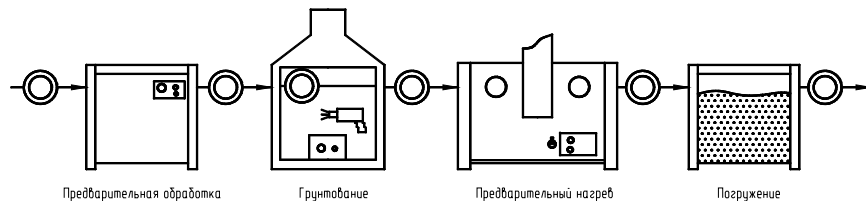


Рис. 1. Схема технологического процесса нанесения полимерного покрытия

При проведении процесса нанесения покрытия в псевдооживленном (кипящем) слое загрунтованную шлицевую втулку предварительно нагревают в течение определенного периода времени, продолжительность которого зависит от формы и массы детали, до температуры, превышающей температуру плавления полимера. Затем нагретую деталь погружают в псевдооживленный (кипящий) слой порошка, который перемешивается или флюидизируется струей воздуха со средним напором, проходящей сквозь пористую мембрану на дне установки [3–4].

Суспендированный порошок ведет себя так же, как жидкость, поэтому частички порошка распределяются по всей поверхности детали, достигая самых труднодоступных мест. Соприкасаясь с нагретой поверхностью, они плавятся, образуя слой покрытия.

Для нанесения полимерного покрытия на детали в псевдооживленном слое преимущественно применяются одноместные установки для нанесения полимерного покрытия (рис. 2).

образом зависит от величины расстояния между роботом и заданной единицей оборудования. Для промышленных роботов-манипуляторов с шестью степенями свободы это расстояние вычисляется, как расстояние от кисти робота до ближайшей точки на заданной единице оборудования.

Оценка удаленности робота-манипулятора от единицы оборудования m при положении базы робота b может быть записана как

$$\begin{aligned} m &= |d^i - r_c|; \\ d^i &= \|w_i - b\|_2; \\ r_c &= (r + R)/2, \end{aligned} \quad (1)$$

где d^i – расстояние между кистью робота с координатами w_i и точкой с координатами T_i на оборудовании; r_c – расстояние от базы робота до центра доступного ему рабочего пространства.

Значение r_c – это параметр робота-манипулятора, вычисляемый статически. На основе выражений (1) вводится модифицированный алгоритм для поиска положения базы робота-манипулятора, представленный на рис. 2. На рисунке использованы следующие обозначения: **KRA** – функция тестирования достижимости оборудования; **CF** – функция тестирования столкновений; **measure** – функция оценки расстояния до недостижимого оборудования.

```

Алгоритм 2: Для заданного фиксированного положения базы робота  $b$ 
определить достижимое оборудование  $n_R$ , доступное без столкновений
оборудование  $n_S$  и расстояние  $p$  до недостижимого оборудования
1:  $p \leftarrow 0$ 
2:  $n_R \leftarrow 0$ 
3:  $n_S \leftarrow 0$ 
4: для всех  $om_i = 1 \dots N_r \cdot b_i$ 
5:   если  $KRA(T_i, b) = 1 \cdot mo$ 
6:      $n_R \leftarrow n_R + 1$ 
7:   если  $CF(T_i, b) = 1 \cdot mo$ 
8:      $n_S \leftarrow n_S + 1$ 
9:   конец если
10: иначе
11:    $m = measure(T_i, b)$ 
12:    $p \leftarrow p + m$ 
13: конец если
13: конец для

```

Рис. 2. Модифицированный алгоритм для поиска положения базы робота-манипулятора

Критерий для оценки качества компоновки робототехнической системы может быть представлен следующим образом:

$$f(b) = n_{cf}(b) + \alpha f_p(b). \quad (2)$$

Штрафная функция f_p в формуле (2) позволяет учесть направление поиска. Множитель α принимает значение низкое по сравнению с величиной n_{cf} , а функция f_p не выпукла. Такой подход представлен в алгоритме, приведенном на рис. 3. На рисунке обозначение **FE** – функция тестирования достижимости, тестирования столкновений и оценки расстояния до недостижимого оборудования, работающая в соответствии с алгоритмом, представленным ранее на рис. 2.

Алгоритм 3. Для заданного фиксированного положения базы робота b определить достижимое оборудование n_R доступное без столкновений оборудование n_{cf} и расстояние p до недостижимого оборудования для компоновки W	
1:	$p \leftarrow 0$
2:	$n_R \leftarrow 0$
3:	$n_{cf} \leftarrow 0$
4:	для всех $от i=1 до N_R$
5:	инициализировать геометрическую модель W
6:	$(p^i, n_R^i, n_{cf}^i) = FE(b)$
7:	$p \leftarrow p + p^i$
8:	$n_R \leftarrow n_R + n_R^i$
9:	$n_{cf} \leftarrow n_{cf} + n_{cf}^i$
10:	конец для

Рис. 3. Алгоритм для поиска положения базы робота-манипулятора для набора геометрических моделей робототехнической системы

Пример графической визуализации множества возможных положений базы манипулятора, полученной на базе программной реализации алгоритма 3, показан на рис. 4.

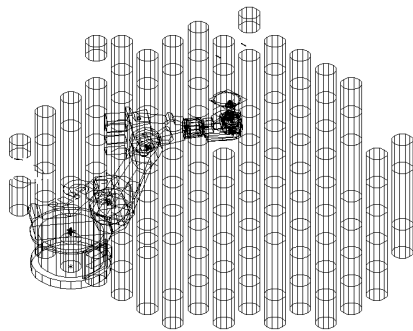


Рис. 4. Визуализация множества возможных положений базы манипулятора

УДК 621.793

А. В. ПОПРУКАЙЛО¹

Г. А. КОСТЮКОВИЧ¹, канд. техн. наук, доц.

М. Е. КИПНИС¹

Е. В. ОВЧИННИКОВ², д-р техн. наук, доц.

Д. С. КАЛЫНОВ³

¹ОАО «Белкард» (Гродно, Беларусь)

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (Гродно, Беларусь)

³ООО «Викон – Авто» (Чкаловск, Россия)

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

Аннотация

Важной особенностью конструкции карданных передач является наличие шлицевого соединения. Шлицевое соединение предназначено для компенсации изменения длины карданной передачи при ее эксплуатации, является элементом, имеющим наибольшие зазоры и нагрузки в паре трения, обусловленные действием крутящего момента и осевых сил, и во многом определяет долговечность карданной передачи. Эти силы в трансмиссиях автомобилей в тяжелых условиях движения достигают 50 кН. Одним из методов повышения долговечности пар трения является применение антифрикционных покрытий. При этом осевые силы уменьшаются в 5 раз, что более чем в 2–3 раза повышает эксплуатационный ресурс подшипников коробок передач и ведущих мостов, а также износостойкость самих подвижных шлицевых соединений. Технология нанесения антифрикционных полимерных покрытий достаточно сложна и требует применения специального оборудования, специальных методов подготовки поверхности и точного соблюдения температурных режимов.

Представлен анализ технологии формирования антифрикционного полимерного покрытия на деталях шлицевых соединений карданных передач. Показано, что применение разработанной и внедренной в производство ОАО «Белкард» (г. Гродно) установки для нанесения полимерного покрытия в псевдооживленном слое позволяет оптимизировать технологию нанесения полимерного покрытия шлицевых втулок карданных передач, значительно повысить стабильность и производительность процесса, улучшить качество и условия труда.

Ключевые слова:

карданная передача, шлицевое соединение, шлицевая втулка, антифрикционное покрытие, псевдооживленный слой, технология покрытий, установка для нанесения покрытий.

Введение. Предъявляемые в настоящее время требования к долговечности и конкурентоспособности автотракторной техники вызывают необходимость значительного увеличения долговечности входящих в нее агрегатов, в том числе и карданных передач. Элементом, определяющим срок службы карданной передачи, является шлицевое соединение. Износ шлицевого соединения приводит к нарушению центрирования шлицев, что вызывает вибрацию карданной передачи, отрицательно сказывающуюся на долговечности

Заключение. Рассмотрена схема фрезерования плоской поверхности вращающейся заготовки и получены формулы для нормальной силы и силы трения. Анализ формул позволил установить уменьшение нормальной силы при увеличении угла наклона режущей кромки, что позволяет за счет изменения последнего управлять силой и мощностью резания.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают полученные теоретические зависимости при фрезеровании заготовок концевой фрезой. С увеличением угла наклона режущих кромок в пределах $30^\circ \dots 48^\circ$ установлено уменьшение силы резания до 18 %...23 %. Уменьшению силы резания также способствует врезание фрезы в заготовку по касательной, попутное фрезерование вращающейся заготовки и прерывистой (уменьшение длины) режущей кромки. Полученные зависимости позволяют оптимизировать режим резания, повысить производительность обработки и эффективность использования мощности привода станка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грановский, Г. И.** Кинематика резания / Г. И. Грановский. – Москва: Машгиз, 1948. – 199 с.
2. **Попок, Н. Н.** Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, М. В. Черневич // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: Бизнесофсет, 2014. – С. 93–95.
3. **ГОСТ 25762.** Обработка резанием. – Москва: Изд-во стандартов, 1983. – 24 с.
4. **Бобров, В. Ф.** Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машгиз, 1962. – 152 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.: ил.

Контакты:

n.porok@psu.by (Попок Николай Николаевич);
v.anisimov@psu.by (Анисимов Виталий Сергеевич);
korba79@mail.ru (Корба Кирилл Васильевич).

N. N. POROK, V. S. ANISIMOV, K. V. KORBA

DYNAMICS OF THE CUTTING PROCESS WITH CUTTERS WITH STEEPLY INCLINED CUTTING EDGES

Abstract

The advantages of milling the surfaces of parts with a tool with a tangential movement of a steeply inclined cutting edge are considered, the results of theoretical and experimental studies of the dynamics of the milling process of flat surfaces of parts are presented.

Keywords:

milling, milling cutter, dynamics, tangential motion, angle of inclination of the cutting edge.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hwang, Y. K.** Optimizing Robot Placement for VisitPoint Tasks / Y. K. Hwang, P. A. Watterberg // Proceedings of the AI and Manufacturing Research Planning Project. – 1996. – P. 2–4.
2. Development of Optimisation Tools in the Context of an Industrial Robotic CAD Software Product / D. Barral [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – Vol. 15, № 11. – P. 822–831.
3. Optimal robot placement using response surface method / B. Kamrani [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 44. – P. 201–210.
4. Workpiece placement optimization in robotic-based manufacturing / S. Caro [et al.] // IFAC Proceedings. – 2013. – Vol. 46. – P. 819–824.
5. **Hsu, D.** Placing a Robot Manipulator Amid Obstacles for Optimized Execution / D. Hsu, J.-C. Latombe, S. Sorkin // Proc. IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning. – 1999. – P. 280–285.
6. Multi-objective path placement optimization of parallel kinematics machines based on energy consumption, shaking forces and maximum actuator torques: Application to the Orthoglide / R. Ur-Rehman [et al.] // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45. – P. 1125–1141.
7. Методика оптимального размещения роботов-манипуляторов в задачах автоматизированного проектирования / М. М. Кожевников [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 42–51.

Контакты:

kmmk@mail.ru (Кожевников Михаил Михайлович);
mail@bgut.by (Ганак Ольга Борисовна).

M. M. KOZHEVNIKOV, O. B. GANAK

METHODS FOR AUTOMATED DESIGN OF LAYOUTS OF ROBOTIC SYSTEMS

Abstract

The problems of computer-aided design of layouts for robotic systems which used in mechanical engineering have been studied. Methods and criteria are proposed for searching of a rational layout with minimal cycle time of a robotic system.

Keywords:

robotic system, computer-aided design, layout.

Е. А. КУДИНОВ

А. А. ВЛАДИМИРОВ, канд. техн. наук

А. В. МАКАРОВ, канд. техн. наук, доц.

Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»
(Старый Оскол, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ НА ИЗНОС РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация

Объектом исследования выступает процесс токарной обработки образцов с наплавленным слоем методом виброточения. Целью работы является выявление оптимальных показателей режимов амплитудно-частотных колебаний процесса вибрационного точения. Результатами исследования выступают измеренные шероховатости поверхности образцов и значения абсолютных износов режущих пластин.

Ключевые слова:

эксплуатационные характеристики, амплитуда колебаний, частота колебаний, абсолютный износ, изменение геометрии, режущая кромка.

Введение. На сегодняшний день в машинах и механизмах применяются различные материалы с повышенными физико-механическими характеристиками. Таким материалам свойственна повышенная износостойкость, что отрицательно сказывается на обрабатываемости резанием. Следствием этого является повышенный износ режущего инструмента, используемого для их обработки. Для решения этой проблемы создаются и модернизируются уже существующие методы и способы различных механических обработок поверхностей деталей из материалов, принадлежащих к этой группе [4]. В статье рассматривается один из методов вибрационной обработки, а именно вибрационное точение с вынужденными тангенциальными колебаниями маятникового типа.

Этот метод позволяет повысить период стойкости за счет особенностей движения режущего инструмента в процессе механической обработки. Во время вибрационного точения вершина режущей кромки периодически выходит из зоны контакта с обрабатываемой заготовкой, что сопровождается снижением температур в зоне резания и на поверхности режущего инструмента.

Целью исследования является определение оптимальных значений амплитудно-частотных параметров процесса вибрационного точения образцов с наплавленным на них покрытием.

Основная часть. Лезвийная обработка поверхностей деталей с помощью метода вибрационного точения заключается в приложении к вершине режущего инструмента вынужденных колебаний маятникового типа с определенными значениями частот от 10 до 200 Гц. Инструмент, совершая колебания, отклоняется от нулевого положения в положительную и отрицательную амплитуды с диапазоном значений от 10 до 300 мкм [3].

представлен на рис. 4. На рис. 5 показаны изменения сил P_{xy} и $P_{танг}$, полученные пересчетом суммарных значений P_x , P_y , P_z .

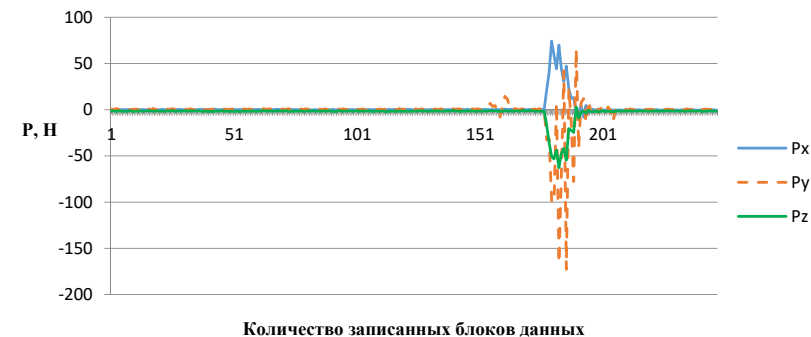


Рис. 4. Зависимости составляющих сил резания при $\lambda = 48^\circ$ от времени обработки

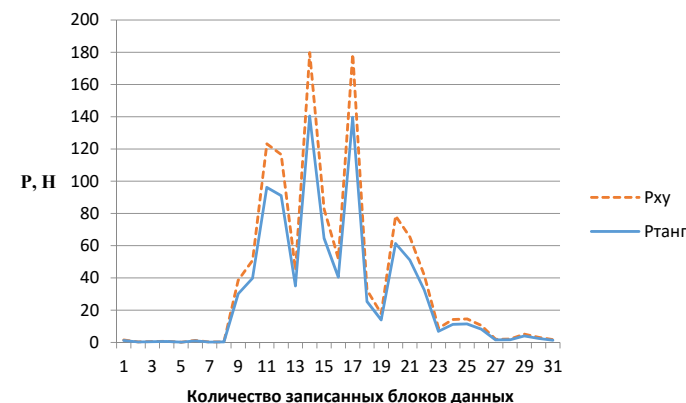


Рис. 5. Зависимости составляющих сил резания при $\lambda = 48^\circ$, полученные пересчетом

Установлено, что с увеличением угла наклона режущей кромки составляющие силы резания уменьшаются. К уменьшению сил резания также приводит уменьшение длины режущей кромки за счет выполнения ее прерывистой, что подтверждает результаты теоретических исследований. Уменьшению силы также способствует врезание фрезы в заготовку по касательной. Установлено, что большие значения угла наклона режущей кромки увеличивают осевую составляющую силы резания и в этом случае целесообразно переходить к схеме плунжерного фрезерования.

При обработке вращающейся заготовки по схеме встречного фрезерования наблюдается рост силы резания, а при попутном фрезеровании – уменьшение.

в зависимости от заданных условий резания (в данном случае $\lambda = 0^\circ \dots 27^\circ$), приводит к некоторому снижению нормальной силы N (см. рис. 2). Если учитывается только тангенциальная составляющая силы резания P_z , которая имеет наибольшее значение, по сравнению со значениями P_x и P_y , то при $\lambda = 0^\circ$ нормальная сила N имеет максимальное значение и по мере увеличения значения λ (от 0° до 90°) значения N уменьшаются до 0 (см. рис. 2).

Аналогичным образом анализируется влияние угла наклона режущей кромки на нормальную силу N по формуле (6), на нормальную и касательную силы трения по формулам (7) и (8), с учетом углов θ (см. формулу (5)) и η (см. формулу (9)), а также на работу деформации, сдвига и трения.

Для проверки результатов теоретического анализа динамических характеристик фрезерования были проведены эксперименты по измерению сил резания. Методика экспериментальных исследований включает последовательное измерение сил резания при обработке заготовок концевыми фрезами с различными углами наклона главной режущей кромки. Значения угла наклона варьировались в диапазоне $30^\circ \dots 48^\circ$, диаметр фрез – 10 мм, число зубьев – 4. Одна из фрез имела прерывистую главную режущую кромку. Режим резания изменялся как по классическому методу, так и по методу планирования эксперимента. Схема обработки предусматривала фрезерование лыски при последовательном повороте заготовки на очередной ход фрезы. Рассматривалось как встречное, так и попутное фрезерование. Проводились отдельные опыты по фрезерованию вращающейся заготовки. При измерении сил резания принята система координат станка. Обработка проводилась на вертикальном обрабатывающем центре FANUC Robodril серии a-D21LiB. Материал заготовки – сплав алюминия Д16т. Для измерения сил резания был спроектирован и изготовлен программно-измерительный комплекс (рис. 3), который позволил фиксировать изменение силы в коротком промежутке времени (50 мс).

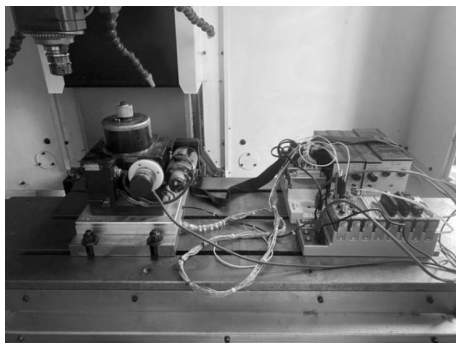


Рис. 3. Программно-измерительный комплекс

В результате измерений получены зависимости изменения сил по координатам станка от времени обработки, отдельный фрагмент которых

На рис. 1 показаны положения колебаний инструмента во время протекания процесса обработки: *a* – нижнее положение (холостой ход); *б* – нейтральное положение (нулевая точка); *в* – верхнее положение (рабочий ход); *г* – нижнее положение (после образования профиля канавки). Осью колебаний является точка закрепления инструмента O в вибронной установке.

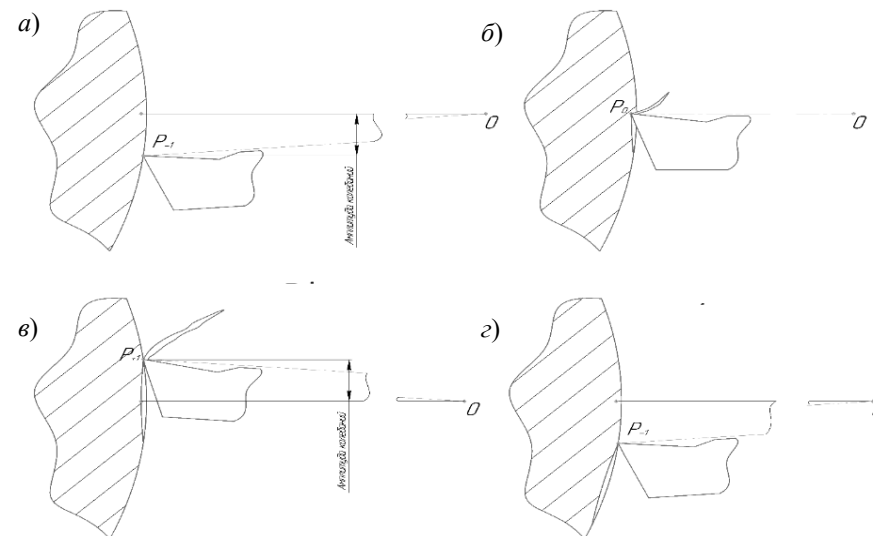


Рис. 1. Схема колебаний режущего инструмента: *a* – нижнее положение инструмента; *б* – нейтральное положение инструмента; *в* – верхнее положение инструмента; *г* – нижнее положение инструмента (после образования профиля канавки)

Материалом образцов при проведении серии экспериментов выступала сталь 20X13 с наплавленным слоем из проволоки ASM 4603 со средним значением твердости по шкале Роквелла HRC 51...54. Наплавляемый на поверхность детали слой имеет химический состав, представленный в табл. 1.

Табл. 1. Химический состав наплавленного материала

Наименование химического элемента	Cr (хром)	V (ванадий)	Mo (молибден)	Mn (марганец)	W (вольфрам)
Процентное содержание, %	6,5	1,1	1,5	2,0	2,6

Режимы вибрационного резания были выбраны из оптимального диапазона амплитудно-частотных параметров на основании предварительных исследований.

После проведения каждого эксперимента шероховатость поверхности образца контролировалась при помощи профилометра TR200, а при помощи

лабораторных весов ВК-300 измерялись массы режущих пластин после обработки поверхностей образцов.

Полученные значения шероховатостей поверхностей образцов и абсолютных износов пластин отображены в табл. 2 и соотносятся с каждым из режимов проведения эксперимента.

Табл. 2. Режимы обработки вибрационного точения и численные значения параметров обработанных поверхностей

Шифр эксперимента	Скорость резания V , м/мин	Глубина резания t , мм	Частота колебаний вершины режущего инструмента f , Гц	Амплитуда колебаний вершины режущего инструмента A , мкм	Продольная подача инструмента S , мм/об	Среднее значение шероховатости поверхности Ra , мкм	Абсолютный износ пластины, г
Э.3.1	70	0,5	24	50	0,057	1,0	< 0,05
Э.4.1					0,11	0,95	< 0,05
Э.5.1					0,2	1,0	< 0,05
Э.6.1				100	0,057	0,95	< 0,05
Э.7.1					0,11	0,65	0,05
Э.8.1					0,2	1,2	0,1
Э.9.1				150	0,057	1,1	0,05
Э.10.1					0,11	1,1	0,05
Э.3.2					0,2	1,8	0,05
Э.4.2			48	50	0,057	1,25	0,05
Э.5.2					0,11	1,35	0,1
Э.6.2					0,2	2,45	< 0,05
Э.7.2				100	0,057	0,75	0,1
Э.8.2					0,11	0,9	0,05
Э.9.2					0,2	0,9	0,05
Э.10.2				150	0,057	0,85	0,1
Э.11.1					0,11	0,75	0,05
Э.12.1					0,2	0,9	0,1
Э.13.1			72	50	0,057	0,7	0,15
Э.14.1					0,11	0,7	0,1
Э.15.1					0,2	1,1	0,05
Э.16.1				100	0,057	0,75	0,1
Э.17.1					0,11	0,85	0,1
Э.18.1					0,2	0,85	0,3
Э.11.2				150	0,057	1,1	0,2
Э.12.2					0,11	1,0	0,1
Э.13.2					0,2	1,2	< 0,05

Полная сила трения

$$F = \frac{F_N}{\cos \eta}. \quad (10)$$

Средний коэффициент трения

$$\mu = \frac{F}{N}. \quad (11)$$

Определим величины характеристик процесса резания, входящих в формулы (1)–(11), для рассматриваемого случая обработки лыски (плоской поверхности) детали вращающимся инструментом (концевой фрезой). Ширина обрабатываемой поверхности составляет 7 мм, глубина резания – 1 мм. Весь припуск снимается за один проход. Материал заготовки – сплав алюминия Д16т с $\sigma_B = 440$ МПа. В качестве режущего инструмента используется 4-зубая твердосплавная концевая фреза диаметром 10 мм, скорость резания принимается равной 250 м/мин. Зная исходные данные об обрабатываемом материале и режущем инструменте, рассчитывается главная составляющая силы резания P_z по общепринятой формуле $P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot s^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}} \cdot K_{pz}$ [5]. При определении влияния угла наклона режущей кромки λ на процесс резания принимается следующее соотношение составляющих силы резания: $P_x = 0$ и $P_y = 0$.

Результаты расчетов представлены в виде фрагментов графиков на рис. 2.

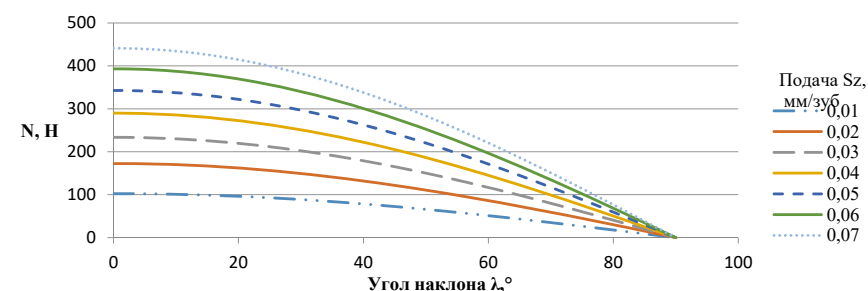


Рис. 2. Влияние угла наклона режущей кромки λ на нормальную силу резания при соотношении составляющих силы резания $P_x = 0$ и $P_y = 0$

Если учитываются все три составляющие силы резания P_x , P_y и P_z , то, согласно формуле (3), изменяется положение результирующего вектора силы резания относительно режущей кромки инструмента. Это приводит к изменению угла ϑ . В свою очередь угол ϑ , входящий в формулу (4), влияет на значение угла λ , уменьшая или увеличивая его значения. Это изменение λ ,

Нормальная к режущей кромки сила N_{yz} , действующая вдоль поверхности резания,

$$N_{YZ} = P'_Z \frac{\cos(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta} \quad (4)$$

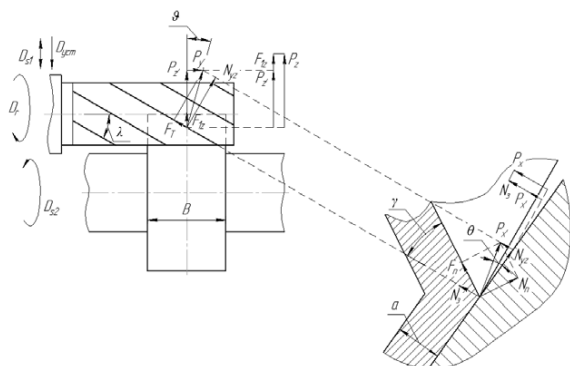


Рис. 1. Схема для определения нормальной силы и сил трения на передней поверхности инструмента с углом $\lambda \neq 0$

Вспомогательный угол

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P'_X}{N_{YZ}}. \quad (5)$$

Нормальная к передней поверхности силы

$$N = \frac{N_{YZ}}{\cos\theta} \cos(\theta + \gamma). \quad (6)$$

Нормальная сила трения

$$F_N = \frac{N_{YZ}}{\cos\theta} \sin(\theta + \gamma). \quad (7)$$

Касательная сила трения

$$F_T = P'_Z \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\cos \vartheta}. \quad (8)$$

Угол между нормальной и полной силой трения

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{F_T}{F_N}. \quad (9)$$

Внешний вид и характер износа режущих кромок после измерения численных параметров был запечатлен цифровым микроскопом U500X с кратностью приближения фотографии поверхности в 40 раз.

На фотографиях (рис. 2) приводятся абсолютные износы режущих пластин после обработки экспериментальных образцов. Представлены износы пластин, обрабатывающих образцы с разными амплитудно-частотными режимами процесса вибрационного точения.

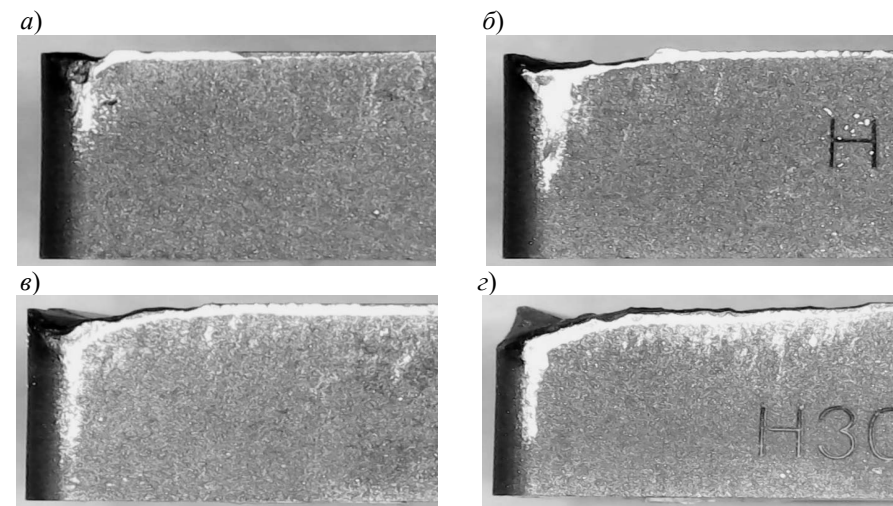


Рис. 2. Износ пластины: *a* – после обработки с режимом обработки № 1, вид сбоку; *б* – после обработки с режимом обработки № 15, вид сбоку; *в* – после обработки с режимом обработки № 19, вид сбоку; *г* – после обработки с режимом обработки № 24, вид сбоку

На рис. 2, *а* показана режущая пластина на виде сбоку после механической обработки с режимом № 1. Как видно из рисунка, величина изношенной зоны небольшая и располагается у вершины режущих кромок пластины. Абсолютное значение износа этой пластины после взвешивания менее 0,05 г [2].

На рис. 2, б изображена режущая пластина после обработки с вибрационным режимом точения № 15. Обработка образца таким режимом сопровождается расширением зоны изношенной кромки и увеличением глубины бороздки в месте контакта вершины пластины с обрабатываемой заготовкой, значение абсолютного износа также осталось равным 0,05 г.

Рис. 2, в представляет режущие кромки пластины после обработки с вибрационным режимом обработки № 19. Абсолютный износ, равный 0,15 г, проявился в виде образования бороздки, распространившейся на обе режущие кромки пластины.

На рис. 2, *з* изображена фотография режущих кромок пластины после экспериментов с обработкой режимом вибрационного точения № 24, максимальное значение абсолютного износа равно 0,3 г. Наблюдается значительное

изменение геометрии режущих кромок пластины вследствие появления бороздки со сколом частей режущих граней.

Заключение. В ходе проведения практических экспериментов с механической обработкой экспериментальных образцов с наплавленным слоем проволокой марки ASM 4603 с повышенными физико-механическими характеристиками были измерены значения абсолютных износов режущих кромок пластин для 27 режимов обработки виброточением.

Значения износов находились в диапазоне от 0,05 до 0,3 г от начальных масс режущих пластин. При превышении критических значений амплитудно-частотных параметров вибрационного точения происходило механическое разрушение режущих кромок пластин, а именно откалывание части пластины.

Такие разрушения приводили к резкому увеличению износа поверхности режущих пластин, быстрой потере общей массы и невозможности использования такой пластины для дальнейшей механической обработки [1].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balla Srinivasa Prasad. Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis / Balla Srinivasa Prasad, M. Prakash Babu // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2017. – Vol. 20, iss. 1.
2. Гаркунов, Д. Н. Триботехника: учебное пособие / Д. Н. Гаркунов, Э. Л. Мельников, В. С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2013. – С. 38–46.
3. Пегашкин, В. Ф. Определение условий образования регулярного микрорельефа поверхностного слоя детали при УВКК / В. Ф. Пегашкин, Г. А. Осипенкова, Н. Ю. Кукина // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 57–59.
4. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – Ленинград: Машиностроение, 1982. – 240 с.

Контакты:

ekudinov81@gmail.com (Кудинов Егор Алексеевич);
vladimirov.al.an@yandex.ru (Владимиров Александр Андреевич);
makarov.av@mail.ru (Макаров Алексей Владимирович).

E. A. KUDINOV, A. A. VLADIMIROV, A. V. MAKAROV

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF AMPLITUDE AND FREQUENCY OF VIBRATION TURNING ON WEAR OF CUTTING TOOLS

Abstract

The object of the study is the process of mechanical processing of deposited surfaces using the vibration turning method. The purpose of the work is to determine the optimal range of values of the amplitude-frequency parameters of vibrations. The results of the study are the values of the roughness of the machined surfaces and the absolute wear of the cutting inserts.

Keywords:

operational characteristics, vibration amplitude, vibration frequency, absolute wear, geometry change, cutting edge.

продольное точение резцом с углом наклона режущей кромки, равным 90° , когда режущая кромка касательна к обработанной поверхности, и продольное точение широким резцом с углом наклона режущей кромки, не равным 0° , и углом в плане, равным 0° , когда режущая кромка перемещается вдоль самой себя. Он доказал, что увеличение угла λ при свободном резании уменьшает степень деформации стружки по длине, толщине и ширине.

При механической обработке поверхностей деталей большое значение имеют величины деформации срезаемого слоя, совершаемой при этом работы и потребляемой мощности приводом станка. Особенно актуален учет этих величин при обработке на станках с ЧПУ, для которых характерен нестационарный процесс резания с изменяющимися во времени кинематическими и динамическими показателями. Как правило, современные станки с ЧПУ позволяют фиксировать мощность в процессе резания и корректировать элементы режима резания. Дополнительные возможности по управлению процессом резания обеспечивает применение режущих инструментов с крутонаклонной режущей кромкой. Влияние изменения угла наклона режущей кромки за счет кинематических особенностей обработки плоских и криволинейных поверхностей вращающейся детали вращающимся инструментом (фрезой) на динамические характеристики процесса резания в настоящее время изучены недостаточно. Результаты ниже рассмотренных исследований были положены в основу совершенствования и развития обработки поверхностей деталей в виде тел вращения вращающимся инструментом, реализуемой на современных трех- и пятиосевых станках с ЧПУ.

Основная часть. Для определения влияния угла наклона режущей кромки инструмента и ее касательного движения резания на параметры (скорость резания, подача) и характеристики (сила резания) процесса резания рассмотрим схему обработки плоской поверхности вращающейся детали вращающимся инструментом (рис. 1).

Согласно методике, изложенной в [4], определим нормальную силу N , силу трения F и ее составляющие F_N и F_T .

Часть главной составляющей силы резания

$$P'_Z = P_Z - F_{1Z}. \quad (1)$$

Часть силы подачи

$$P'_X = P_X - N_1. \quad (2)$$

Вспомогательный угол

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{P_Y}{P_Z}. \quad (3)$$

УДК 621.91.01/621.914.22

*Н. Н. ПОПОК, д-р техн. наук, проф.**В. С. АНИСИМОВ**К. В. КОРБА*

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (Новополоцк, Беларусь)

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ФРЕЗАМИ С КРУТОНАКЛОННЫМИ РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ**Аннотация**

Рассмотрены преимущества фрезерования поверхностей деталей инструментом с касательным движением крутонаклонной режущей кромки. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики процесса фрезерования плоских поверхностей деталей.

Ключевые слова:

фрезерование, фреза, динамика, касательное движение, угол наклона режущей кромки.

Введение. В связи с развитием металлорежущих станков с ЧПУ, позволяющих реализовывать трех-, четырех- и пятиосевую обработку с обеспечением требуемых значений мощности и скорости резания, увеличивается количество применяемых на практике кинематических схем резания, предложенных проф. Г. И. Грановским [1]. Реализованы такие виды обработки, как винтовая интерполяция, трепанация, трохоидальное и плунжерное резание, в которых реализуются сложные движения и траектории резания, например винтовая, циклоида, трохоида и т. п. [2]. Зачастую в этих видах обработки рекомендуется использовать касательное движение (врезание по касательной) режущих лезвий, а также вращающийся режущий инструмент с крутоспиральными режущими кромками как обеспечивающие плавное (безударное) резание. Эти предложения присутствуют в каталогах и рекламных материалах ведущих в области металлообработки зарубежных фирм, таких как SandvikCoromant (Швеция), Seco (Япония), Hertel (Германия), Iscar (Израиль), TaeguTec (Корея) и др. При этом не объясняется, за счет каких физических и технологических аспектов обработки обеспечиваются преимущества применения касательного движения и инструментов с крутоспиральными режущими кромками. Вместе с тем физические явления, сопровождающие сложные виды обработки резанием, ранее исследовались и описывались ведущими отечественными учеными Г. И. Грановским, Ю. А. Новоселовым, В. В. Шварцем и др.

Согласно ГОСТ 25762 [3] касательное движение D_k – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента, скорость которого меньше скорости главного движения резания и направлена по касательной к режущей кромке, предназначенное для того, чтобы сменять контактирующие с заготовкой участки режущей кромки. В. Ф. Бобров [4] трактует понятие касательного движения шире и рассматривает наружное

УДК 621.762

И. А. ЛОЗИКОВ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ВВЕДЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЛИГАТУР И ТЕМПЕРАТУРЫ ОСНОВЫ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БРОНЗ**Аннотация**

Приведены закономерности формирования структуры и фазового состава модифицированных жаропрочных хромовых бронз, полученных с применением механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента, в зависимости от способов введения модификаторов и температуры основы.

Ключевые слова:

получение, состав, структура, свойства, субмикроструктурные модифицирующие лигатуры, хромовые бронзы.

Введение. Узким местом, сдерживающим процесс и определяющим высокую стоимость хромовых бронз, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур. В то же время существующие на сегодняшний день сплавы данной группы, производимые по классической технологии на предприятиях РФ, обладают довольно ограниченным комплексом физико-механических свойств, в частности – температурой рекристаллизации. Общеизвестно, что перспективным способом повышения свойств литых материалов служит модифицирование. При этом наиболее эффективно применение модифицирующих лигатур. Однако литературные сведения о получении и применении модификаторов и модифицирующих лигатур для производства бронз электротехнического назначения, направленном на упрощение технологии изготовления и повышения их физико-механических свойств, отсутствуют. Одним из перспективных методов решения проблемы является применение реакционного механического сплавления, обеспечивающего получение модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента и исключаяющего из технологического процесса их производства высокотемпературную плавку.

Цель работы: изучить влияние основных технологических факторов при получении хромовых бронз с использованием модифицирующих лигатур на химический состав, структуру и свойства; установить кинетику формирования структуры сплавов в зависимости от температуры основы при плавке.

Получение экспериментальных образцов сплавов проводилось методом открытой плавки в высокочастотной индукционной печи с применением графитовых тиглей марки АК-10. Заготовки для изучения свойств, структуры и химического состава получаемых бронз вырезались из отливок, заливаемых в стальной водоохлаждаемый кокиль с системой направленного отвода тепла. В качестве основы литых сплавов использовали медный прокат Ø50 марки М1 (ГОСТ 859–2001). Лигатура, содержащая 20 % Cr и полученная по оптимальному режиму, разработанному ранее, вводилась в виде мерных прутков Ø16 для получения бронзы BrX с химическим составом, соответствующим ГОСТ 18175–78. Так как одним из наиболее важных параметров, определяющим физико-механические

свойства, является химический состав бронз, на спектрографе SPECTROMAXx контролировали содержание основных элементов, вводимых в сплав, – Cr, В, Р. Изучение структуры и элементного состава проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа «TescanVEGA II SBH».

Результаты исследований и их обсуждение. Выполнение работы условно можно разделить на два этапа. На первом этапе определялось влияние способов подачи модифицирующих механически сплавленных лигатур с высоким содержанием хрома, как основного легирующего элемента, на состав, структуру и свойства жаропрочных хромовых бронз; на втором – влияние температуры медной основы при плавке на эти свойства.

Введение лигатуры осуществлялось двумя способами: прямой загрузкой в тигель с медной основой для последующего совместного расплавления, что проще и предпочтительнее, и введением в расплав за несколько минут перед разливкой. Состав и свойства полученных сплавов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Состав и свойства экспериментальных бронз

Условие получения бронзы	% Cr	σ_B , МПа	HB, МПа	R , 10^3 Ом·м
Загрузка с основой	0,67	420	120	21
Введение в расплав	0,73	480	140	22

Анализ состава и свойств позволяет предположить, что оба способа введения лигатуры практически равнозначны. Но изучение структуры сплавов установило значительное различие между ними. Структура литых материалов, полученных при загрузке с основой, относится к микрокристаллическому типу с размером зерен 20...25 мкм, объединенные в группы размером 150...200 мкм (рис. 1).

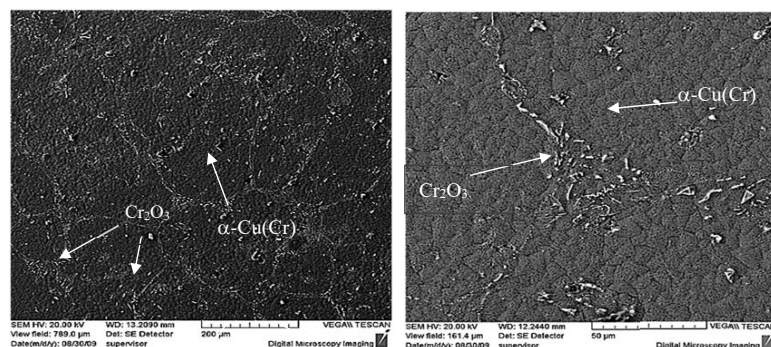


Рис. 1. Структура литых сплавов, полученных при загрузке с основой

Наряду с α -твердым раствором Cr в Cu присутствуют отдельные самостоятельные включения Cr в окисленном виде. Это указывает на то, что длительная выдержка приводит к коагуляции и окислению Cr лигатуры и, как следствие, снижению ее модифицирующего эффекта и жаропрочности сплава.

Полученные введением лигатуры в расплав сплавы также можно отнести к микрокристаллическому типу, но уже с размером зерна 2...5 мкм, что на порядок

формообразующих деталей. В результате этого ухудшается качество поверхности изделия, увеличиваются параметры шероховатости, изменяются размеры. При резком нагреве и охлаждении происходят термические напряжения и термическая усталость, вследствие чего в детали образуются трещины, заливы материала в виде гребешков. Пресс-форма также выходит из строя из-за налипания и привара материала к формообразующим поверхностям, на них возникают вмятины.

Указанные многочисленные дефекты делают невозможным дальнейшую эксплуатацию пресс-формы и требуют ее ремонта или замены на новую.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Польский, Е. А.** Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей / Е. А. Польский, С. В. Сорокин // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 6 (132). – С. 38–48.
2. Обеспечение точности станочных узлов на базе унифицированных модулей с учетом контактной жесткости стыков / А. Г. Федук [и др.] // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2019. – № 3 (76). – С. 51–59.
3. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А. Г. Сулов [и др.]. – Москва : Инновационное машиностроение, 2022. – 552 с.

Контакты:

polski.eugene@hotmail.com (Польский Евгений Александрович);
mihail15042013@yandex.ru (Швыряев Михаил Васильевич);
abramov.roma1995@yandex.ru (Абрамов Роман Владимирович);
lsuxovej97@mail.ru (Суховой Вадим Викторович).

E. A. POLSKIY, M. V. CHVIRYAEV, R. V. ABRAMOV, V. V. SUKHOVEI

TECHNOLOGICAL ENSURING DURABILITY OF MOD-GENERATING PREFABRICATED ELEMENTS OF PRESS MOLDS

Abstract

The method of technological ensuring the durability of the forming elements of molds of stamping equipment for the formation of plastic connectors at the stages of design, manufacturing and assembly is considered.

Keywords:

surface quality, errors in shape and relative position of surfaces, blade processing, durability, performance properties.

(включая параметры макроотклонений) и качества контактирующих (базовых) поверхностей с целью определения и прогнозирования величины контактных деформаций в зоне стыка, что, с учетом накопленных перемещений от первого знака к последнему, позволит скорректировать предельные отклонения на исполнительные размеры [2]. В частности, в работах А. Г. Суслова приведены следующие зависимости по расчету контактных перемещений для однократного и многократного нагружения [3]:

$$j_1 = p_H \left/ \sum_{i=1}^2 B \cdot \left[1,2 \cdot \frac{\left(G_i + Rz_{иссм} / 5 \right) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_i}{10^3} \right)^y V_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{иссм} - Wz_{иссм} \right)^x \right) \cdot Hmax_i}{H_{\mu 0i}} \right]^{1/3} \right. + \rightarrow$$

$$\left. + \rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[1,2 \cdot \frac{\left(G_i + Rz_{иссм} / 5 \right) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_i}{10^3} \right)^y V_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{иссм} - Wz_{иссм} \right)^x \right) \cdot Hmax_i}{H_{\mu 0i}} \right]^{1/3}}{G_i + Rz_{иссм} / 5} \right] \right.$$

Для этапа сборки необходимо регламентировать как последовательность комплектования гребенки маркированными знаками, так и усилие закрепления всех элементов. В настоящее время на предприятиях решают эту задачу переходом от принципа взаимозаменяемости к формированию неразъемного соединения знака и корпуса сваркой (рис. 2).

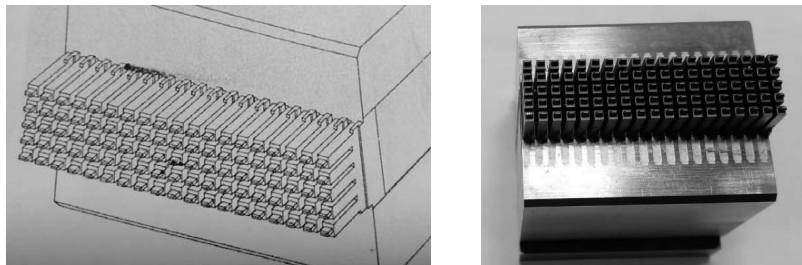


Рис. 2. Конструкторская схема сварки и внешний вид изделия после сборки

Из-за многочисленных факторов (трение между формообразующими поверхностями, коррозия от высокой температуры, взаимодействие в агрессивной среде с химическими элементами) происходит износ поверхностей

меньше по сравнению с предыдущими (рис. 2). В этом случае легирующие элементы имеют равномерное распределение в медной основе, представляя собой α -твердый раствор хрома в меди. При этом самостоятельные включения хрома отсутствуют. Это указывает на то, что экспериментальные бронзы имеют высокую жаропрочность.

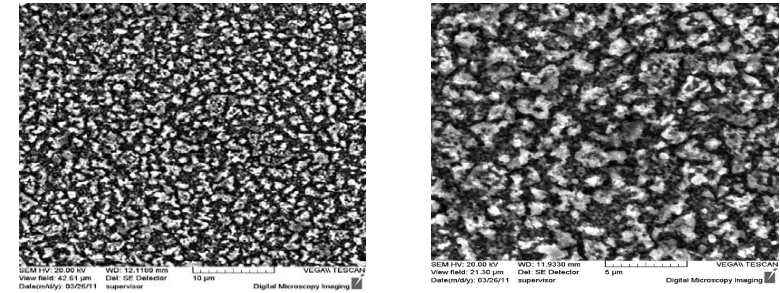


Рис. 2. Структура литых сплавов, полученных при введении лигатуры в расплав

На втором этапе проведения исследований определялась важная составляющая процесса плавки — влияние температуры медной основы и времени легирования расплава на фазовый состав, структуру и свойства литых жаропрочных электротехнических бронз. Вначале исследовали изменение содержания растворенного хрома в получаемой бронзе в зависимости от времени выдержки медной основы. Температура металлической ванны перед легированием составляла 1300 °С, а время выдержки для растворения лигатуры изменялось в пределах 2...30 мин. Содержание хрома в полученной бронзе в зависимости от времени выдержки приведено в табл. 2.

Табл. 2. Содержание хрома в зависимости от времени выдержки расплава

τ, мин	3	5	9	15	21	26	30
% Cr	0,44	0,73	0,88	0,81	0,62	0,52	0,48

Исследование структуры образцов плавок позволило выявить кинетику процесса: вначале сплав сильно ликвирует и образуются области с высоким содержанием хрома, представляющие собой эвтектику медь-хром (рис. 3, а; 4, а). При этом отдельные включения нерастворенного хрома даже на первом этапе уже отсутствуют. Повышение времени выдержки до 9...15 мин приводит к тому, что за счет перемешивания индукционными потоками эвтектика полностью растворяется и сплав приобретает гомогенное строение примерно на 10...12 мин (рис. 3, б). Дальнейшая выдержка негативно сказывается на содержании хрома за счет возрастающего угара. Хромовые бронзы, полученные методом открытой плавки с использованием модифицирующей лигатуры с высоким содержанием основного компонента, имеют высокую плотность. Поры или микровключения не выявлены (см. рис. 3, б); легирующие элементы равномерно распределены в основе (рис. 4, б).

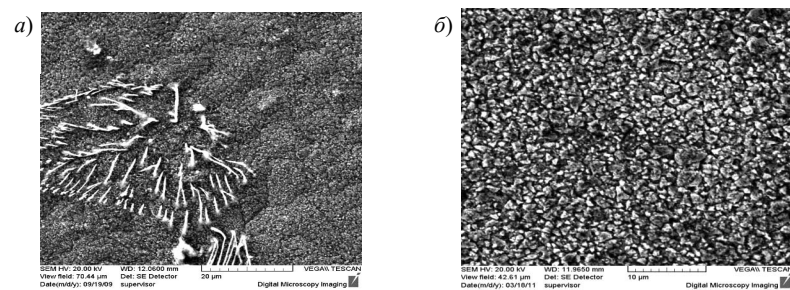


Рис. 3. Структура литой БрХ: а – выдержка 3 мин; б – выдержка 9 мин

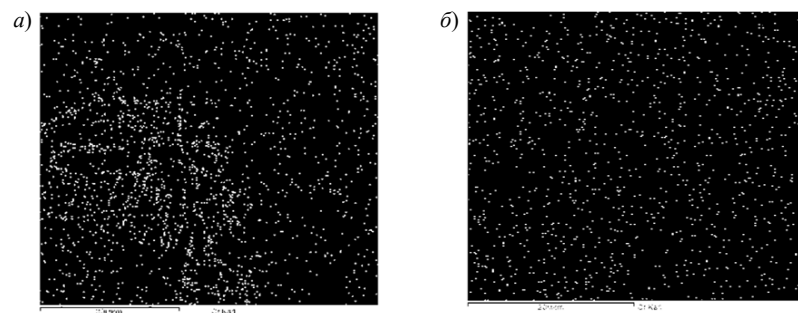


Рис. 4. Распределение хрома в литой БрХ (сканирование по площади): а – выдержка расплава 3 мин; б – выдержка расплава 9 мин

Высокая скорость растворения объясняется наномерным размером включений хрома в лигатуре, получаемой механическим сплавлением. Даже его отдельные непроработанные частицы не превышают 15...20 мкм и на их поверхности отсутствуют оксидные пленки, замедляющие процесс растворения.

Следующим шагом являлось изучение влияния температуры легирования на химический состав и свойства бронз. Плавки проводили аналогично предыдущим, приняв время выдержки расплава 8 мин, а температуру изменяли в диапазоне 1150 °С...1400 °С. Содержание хрома в образцах экспериментальных бронз при изменении температуры медной основы приведено в табл. 3.

Табл. 3. Содержание хрома при изменении температуры расплава

$t, ^\circ\text{C}$	1150	1200	1250	1300	1350	1400
% Cr	0,51	0,64	0,82	0,86	0,82	0,70

Полученные данные позволяют утверждать, что при введении лигатуры с частицами хрома, близкими к нанодисперсному размеру и с неокисленной поверхностью, необходимость в повышенных температурах медной основы

Показатели надежности формообразующей оснастки пресс-форм оказывают основное влияние на получение качественной продукции. Главной особенностью применяемой оснастки для получения многотырьковых разъемов является применение сборных конструкций, включающих набор отдельных элементов – знаков, установленных в корпус коробчатой конструкции.

Качество поверхности и вид соединения деталей играют большую роль в работе пресс-формы. Основным фактором, влияющим на качество изделия, является шероховатость поверхности. Обработка формообразующих поверхностей должна обеспечиваться с шероховатостью не более $Ra = 1,0$ мкм. Для уменьшения износа и сокращения времени извлечения изделия оформляющие поверхности формообразующих элементов подвергаются хромированию, а оформляющие поверхности, которые участвуют в формировании изделия, должны быть изготовлены с допуском не более 0,01 мм (рис. 1).

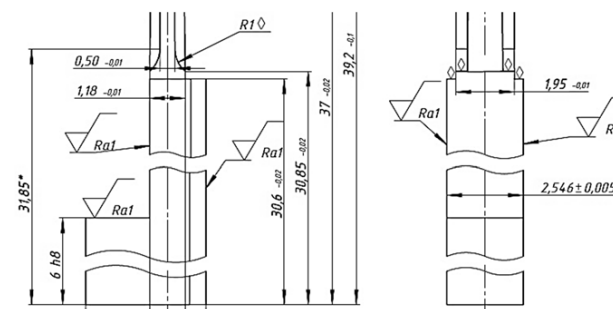


Рис. 1. Фрагмент чертежа знака сборной формообразующей оснастки

Для исследуемого объекта используется марка материала 95×18 ГОСТ 103–2006. Она соответствует основным критериям обеспечения долговечности при эксплуатации. Данная сталь относится к группе легированных сталей и к мартенситному классу нержавеющих сталей. Изделие из данного материала устойчиво к воздействию химически агрессивных среды абразивного износа.

Формообразующие поверхности выполнены с шероховатостью рабочих поверхностей $Ra = 0,1$ мкм. Основные этапы технологического процесса изготовления такой детали включают: предварительное шлифование и электроэрозионную координатно-прошивочную обработку; плоское и профильное и оптикошлифование поверхностей. Чтобы достичь шероховатости поверхности порядка $Ra = 0,1...0,15$ мкм, производится полировка рабочих поверхностей.

Технологическое обеспечение установленных показателей долговечности элементов оснастки для термопластавтоматов включает выполнение взаимосвязанных действий в рамках нескольких этапов жизненного цикла изделия.

Для этапов финишной обработки необходимо выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование параметров точности

УДК 621.753.5

Е. А. ПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доц.**М. В. ШВЫРЯЕВ****Р. В. АБРАМОВ****В. В. СУХОВЕЙ**

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СБОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕСС-ФОРМ****Аннотация**

Рассматривается методика технологического обеспечения долговечности формообразующих элементов пресс-форм штамповой оснастки для формирования пластиковых соединителей на этапах проектирования, изготовления и сборки.

Ключевые слова:

качество поверхности, погрешности формы и взаимного расположения поверхностей, лезвийная обработка, долговечность, эксплуатационные свойства.

На сегодняшний день широко применяют два варианта изготовления элементов формообразующей оснастки: цельное изделие, получаемое вырезкой на электроэрозионном оборудовании с достижением параметров точности и качества поверхности на отделочных операциях, и сборные конструкции, состоящие из отдельных «знаков» формирующих элемент получаемой детали. Оба варианта имеют свои достоинства и недостатки. Сборная конструкция, в отличие от цельной детали, обеспечивает самые благоприятные условия для выхода воздуха при замыкании штампа, что положительно сказывается на качестве получаемой детали.

При проектировании сборной оснастки придерживаются базового принципа взаимозаменяемости – возможность быстрой замены вышедшего из строя знака. Однако, учитывая высокие требования по точности расположения вершин знаков в сборочной единице, в производстве в основном применяют методы регулировки и пригонки сопрягаемых поверхностей. Данные методы выполняются вручную высококвалифицированным персоналом, что увеличивает стоимость работ до 80 % от стоимости всей формообразующей оснастки.

Обеспечение точности расположения каждого звена в составе формообразующей оснастки является основной задачей в процессе сборочной операции. Трудоемкость сборочных работ обуславливается проявившимися погрешностями каждого звена, в связи с чем необходима оптимизация процесса сборки, с учетом возникающих контактных взаимодействий, для обеспечения точности сборки и снижения себестоимости выпускаемой продукции.

Таким образом, технологическое обеспечение требуемых точности и качества формообразующей оснастки пресс-форм для сборочных операций, с учетом влияния контактной жесткости и с корректировкой параметров обработки и предельных отклонений при проектировании с последующим снижением трудоемкости выполненных работ, является актуальной задачей [1].

отсутствует. Все выплавленные при разных температурах сплавы обладают хорошей жидкотекучестью.

Химический состав и свойства бронзы, полученные по оптимальному режиму, приведены в табл. 4.

Табл. 4. Физико-механические свойства литой бронзы, полученные при $t_{\text{легир}} = 1250^\circ\text{C}$ и $\tau_{\text{легир}} = 8$ мин

Марка сплава	Химический состав, %			Физико-механические свойства			
	Cr	Zr	Fe	σ_B , МПа	HB, МПа	δ , %	R , 10^9 Ом · м
БрХ1	0,83	–	0,043	485	150	13	22

Выводы.

1. Наиболее оптимальным способом легирования меди при получении жаропрочных хромовых бронз является метод введения лигатуры непосредственно в расплав с последующей непродолжительной выдержкой для ее расплавления и растворения Cr в основе.

2. Время выдержки расплава при его легировании механически сплавленной лигатурой с высоким содержанием легирующего компонента не превышает 10...12 мин.

3. Нет необходимости перегрева основы для лучшего усвоения Cr. Оптимальная температура при легировании составляет $1250^\circ\text{C} \dots 1300^\circ\text{C}$.

4. Бронзы, полученные открытой плавкой в индукционных печах с применением модифицирующей лигатуры с высоким содержанием легирующего компонента, имеют высокую плотность. Поры или инородные микровключения не выявлены. Легирующие элементы равномерно распределены в основе.

5. Структура экспериментальных модифицированных материалов относится к микрокристаллическому типу с размером зерен основы, не превышающим 2...4 мкм.

Контакты:

Lozikoff@yandex.by (Лозиков Игорь Александрович).

I. A. LOZIKOV**INFLUENCE OF METHODS OF INTRODUCING MODIFYING LIGATURES
AND BASE TEMPERATURE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF BRONZES****Abstract**

The regularities of the formation of the structure and phase composition of modified heat-resistant chrome bronzes obtained using mechanically fused modifying ligatures with a high content of alloying component, depending on the methods of introducing modifiers and the base temperature, are presented.

Keywords:

production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.

УДК 621.865.8

М. Н. МИРОНОВА, канд. техн. наук, доц.**В. В. ЦАРАНОК**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**Аннотация**

Рассмотрены вопросы управления движением мобильного робота. Приведены алгоритмы планирования траектории его перемещения.

Ключевые слова:

мобильный робот, планирование траектории, управление.

В настоящее время мобильные роботы получили широкое практическое применение во многих сферах человеческой деятельности. При этом основной проблемой мобильных роботов является решение задачи навигации. Общепринятый подход к навигации робота заключается в составлении карт рабочего пространства и локализации, информация о которой необходима для решения большинства задач управления: прохождение заданной траектории, поиск траектории к заданной точке, возвращение в исходное положение.

Однако многие роботизированные задачи могут быть решены без какой-либо карты, используя подход пассивной навигации. Например, перемещаться по лабиринту, следуя стене. Очень простой класс роботов, достигающих цели, известен как тележка Брайтенберга и характеризуется прямой связью между датчиками и двигателями. У них нет четкого внутреннего представления об окружающей среде, в которой они работают. Чтобы двигаться по определенному вектору, нужно оценить направление вектора в текущем месте, а для этого требуется как минимум два измерения положения. Для этого можно использовать два датчика двустороннего обнаружения, по одному на каждой стороне тела робота.

Другой класс реактивных роботов известен как «bugs» – простые автоматы, которые выполняют поиск цели при наличии непроходимых областей или препятствий. Существует большое количество алгоритмов для таких роботов, обладающие способностью определять, когда они находятся в непосредственной близости от препятствия. В этом отношении они похожи на тележку Брайтенберга, но bug включают в себя конечный автомат и другую логику между датчиком и двигателями. У этих роботов есть память, которой не было у машины Брайтенберга. Разработано множество вариантов bug-алгоритма, но, повышая производительность в одном типе среды, они могут снижать производительность в других. Принципиально робот ограничен тем, что не использует карту. Он не может видеть общую картину и поэтому выбирает пути, оптимальные локально, а не глобально.

Известно, что средством к достижению наилучшего пути между двумя

Статистическая значимость уравнения регрессии свидетельствует о возможности прогнозирования и управления величиной микротвердости поверхностных слоев на основе построенной эмпирической модели.

Следует также отметить, что полученная эмпирическая зависимость имеет среднюю величину коэффициента детерминации ($r^2 = 0,731$), что объясняется невысокой статистической устойчивостью такого параметра, как микротвердость. Сильная зависимость от условий эксперимента, состояния подготовленного образца, наличия вероятных промахов в измерениях из-за влияния отдельных фаз материала требует повышенного внимания к стабилизации условий подобных экспериментов, а также использования проверенных статистических методов (например, критерия Диксона).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, В. М.** Эмпирическая модель шероховатости, обеспечиваемой при инерционно-импульсной обработке / В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4. – С. 41–49.

Контакты:

pvm@bk.ru (Пашкевич Виктор Михайлович);

vitas-ik@tut.by (Афаневич Виталий Викторович);

angelina.turina.01@mail.ru (Тюрина Ангелина Викторовна).

V. M. PASHKEVICH, V. V. AFANEVICH, A. V. TYURINA

INFLUENCE OF INERTIA-PULSE TREATMENT ON THE MICROHARDNESS OF THE SURFACE LAYER**Abstract**

The results of inertial pulse processing and its effect on the microhardness of the surface layer of internal cylindrical surfaces are presented. Hardened steel SHX15 was used as the material of the deforming ball, and special high-strength cast iron with nodular graphite was used as the material being processed. An empirical model of microhardness during inertial-pulse processing is presented.

Keywords:

surface-plastic deformation, inertial-pulse processing, microhardness, surface layer, empirical model.

Переменными h , s , n обозначены соответственно значения глубины поверхностного слоя, подачи и частоты вращения заготовки. В столбцах HV1...HV5 приведены величины микротвердости в пяти дублирующих экспериментах ($u = 5$). Значение HV_sr – среднее для каждого из уровней. Методика обработки результатов аналогична описанной в [1].

Расчетные значения статистически значимых коэффициентов (на уровне значимости 0,05) составили: $A_0 = 294,15$; $A_1 = -33,85$; $A_3 = -9,9$; $A_{23} = 8,2$. Модель имеет вид

$$HV = 294,15 - 33,85z_1 - 9,9z_3 + 8,2z_2z_3. \quad (1)$$

Коэффициент множественной детерминации составил 0,731.

Для оценки статистической значимости уравнения регрессии (1) расчетное значение критерия Фишера F_{pez} сравнивалось с его критическим значением $F_{\alpha; f_{pez}; f_{ocm}}$, зависящим от ранее определенных чисел степеней свободы f_{pez} и f_{ocm} :

$$F_{pez} = \frac{(S_{pez} / f_{pez})}{(S_{ocm} / f_{ocm})} > F_{\alpha; f_{ocm}; f_{pez}}. \quad (2)$$

$$S_{pez} = 51554,3; f_{pez} = 3; S_{ocm} = 18932,8; f_{ocm} = 36; F_{pez} = 32,67 > 2,87.$$

Так как условие (2) соблюдается, то уравнение множественной регрессии (1) является статистически значимым на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для оценки адекватности модели экспериментальным данным проверялось условие

$$F_{ad} = \frac{(S_{ad} / f_{ad})}{(S_{oui} / f_{oui})} < F_{\alpha; f_{oui}; f_{ad}}. \quad (3)$$

Расчетное значение критерия Фишера F_{ad} сравнивалось с критическим значением $F_{\alpha; f_{oui}; f_{ad}}$: $S_{ad} = 4629,6$; $f_{ad} = 4$; $S_{oui} = 14303,2$; $f_{oui} = 32$; $F_{ad} = 2,58 < 2,67$.

Так как условие (3) соблюдается, то модель (1) является адекватной экспериментальным данным на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Результаты исследований показывают, что в наибольшей мере микротвердость поверхности зависит от параметра глубины (следовательно, упрочнение поверхности относительно исходного состояния материала является статистически значимым), а также от фактора частоты вращения шпинделя (определяющего кинетическую энергию деформирующих шаров). Не оказывает статистически значимого прямого влияния фактор подачи (фактически он оказывает опосредованное воздействие на густоту следов обработки в форме его парного взаимодействия с частотой вращения).

точками является использование карты окружающей среды. Как правило, «лучшее» означает кратчайшее расстояние, но оно также может включать в себя некоторые затраты, связанные с проходимостью, т. е. насколько легко проехать по местности. Более сложный планировщик может также учитывать размер робота, кинематику и динамику транспортного средства и избегать путей, которые включают повороты, более крутые, чем может выполнить транспортное средство.

Существует множество способов представить карту и положение робота на карте. Для представления мест и путей между ними могут использоваться графы. Они могут быть эффективно проанализированы, чтобы найти путь, который минимизирует некоторые затраты, чаще всего пройденное расстояние. Более простым и удобным для компьютера представлением является сетка занятости, которая широко используется в робототехнике. Сетка занятости рассматривает мир как сетку ячеек, где каждая ячейка помечается как занятая или незанятая.

Популярным алгоритмом планирования пути робота является D* (алгоритм инкрементного поиска), который находит наилучший путь через граф, который он сначала вычисляет и который соответствует входной сетке занятости. Алгоритм D* имеет ряд функций, полезных для реальных приложений.

Во-первых, он обобщает сетку занятости до карты стоимости, которая представляет стоимость прохождения каждой ячейки в горизонтальном или вертикальном направлении. D* находит путь, который минимизирует общую стоимость пути. Если интересует кратчайшее время для достижения цели, то стоимость – это время, затрачиваемое на проход через ячейку, и она обратно пропорциональна проходимостью. Если заинтересованы в минимизации ущерба транспортному средству или максимальном комфорте для пассажиров, тогда стоимость может быть связана с неровностями местности внутри ячейки. Затраты, назначенные ячейкам, также будут зависеть от характеристик робота: большой четырехколесный робот может иметь конечную стоимость пересечения местности, тогда как для маленького робота эта стоимость может быть бесконечной.

Во-вторых, алгоритм D* поддерживает поэтапное перепланирование. Это важно, если во время движения обнаруживается, что пространство отличается от карты. Если мы обнаружим, что маршрут имеет более высокую, чем ожидалось, стоимость или полностью заблокирован, мы можем поэтапно перепланировать его, чтобы найти лучший путь. Инкрементное перепланирование требует меньших вычислительных затрат, чем полное перепланирование.

Алгоритм D* позволяет обновлять карту в любое время во время движения робота. После перепланировки робот просто перемещается в соседнюю ячейку с наименьшей стоимостью, что обеспечивает непрерывность движения даже при изменении плана.

Преимущество алгоритма D* заключается в возможности эффективно изменять карту стоимости во время движения. Это довольно распространенное требование в робототехнике, поскольку реальные датчики имеют конечный диапазон, и робот открывает больше пространства по мере продвижения (рис. 1).

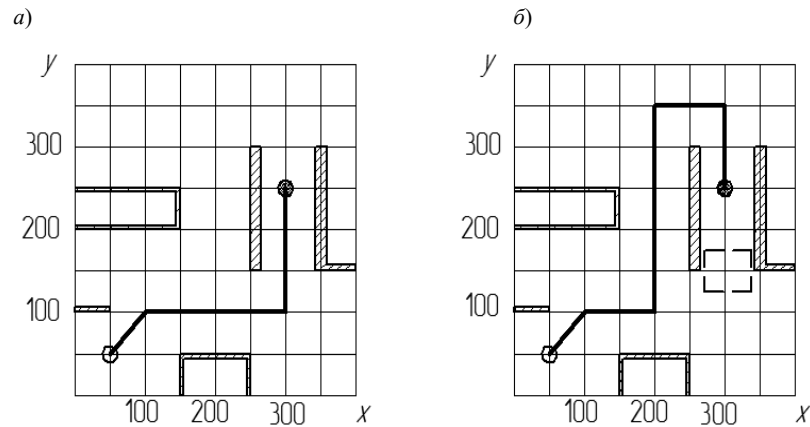


Рис. 1. Пути из планировщика D*: *a* – с исходной картой; *б* – с измененной картой (область с более высокой стоимостью обозначена пунктирным прямоугольником)

Известно, что планирование пути робота осуществляется в два этапа. На этапе планирования осуществляется анализ карты. Фаза запроса используется для нахождения кратчайшего пути. Алгоритмы планирования, такие как дистанционное преобразование и D*, требуют значительного объема вычислений, но фаза запроса очень малозатратна. Однако план всегда зависит от цели. И если цель меняется, то этап планирования должен быть выполнен повторно. Несмотря на то, что алгоритм D* позволяет пересчитывать путь при изменении карты затрат, он не поддерживает изменение цели.

Несоответствие затрат на планирование и запросы привело к разработке дорожной карты, метода, в котором запрос может включать как начальную, так и конечную позиции. Фаза планирования обеспечивает анализ, который поддерживает изменение отправных точек и изменение целей.

Тогда проблема навигации роботов становится задачей построения сети свободных от препятствий путей через окружающую среду. В литературе такая сеть называется дорожной картой. Дорожная карта должна быть рассчитана только один раз и затем ее можно использовать, чтобы перемещаться из любого начального местоположения в любое целевое местоположение.

Первый шаг создания дорожной карты – найти свободное место на карте, которое является дополнением к занятому пространству и представляет собой матрицу с ненулевыми элементами, по которой робот может свободно перемещаться. Граница также является препятствием, поэтому крайние ячейки помечаются как несвободные. На втором этапе вычисляется топологический скелет свободного пространства морфологическим образом. Далее к свободному пространству применяется алгоритм обработки, известный как прореживание.

Высокая вычислительная стоимость рассмотренного метода создания дорожных карт делает их неприменимыми для больших карт и привела к

По-видимому, такой результат, в отличие от предыдущей группы образцов, определяется большей контактной жесткостью поверхности, когда энергия деформирующих шаров распределяется по поверхности материала заготовки и не приводит к значительным пластическим деформациям (энергия в большей степени подвержена диссипации в материале).

На основании проведенных измерений микротвердости построена эмпирическая модель с использованием методики, описанной в [1]. В ней в качестве факторов выбраны три параметра: h – глубина упрочненного поверхностного слоя, мкм; S – подача инструмента, мм/об; n – частота вращения заготовки (шпинделя станка), мин^{-1} . Переменная отклика модели – микротвердость по Виккерсу HV (рис. 4).

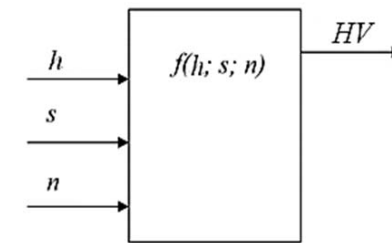


Рис. 4. Структурная схема эмпирической модели микротвердости поверхностных слоев при ИИО

Следует отметить, что для повышения достоверности моделирования учитывались только значения, начиная с глубины 25 мкм, т. к. до глубины 10 мкм и более из-за наличия микронеровностей, микротрещин, краевого эффекта результаты измерений имеют заметную случайную составляющую. Эта глубина соответствует нижнему уровню фактора. Верхнему уровню соответствует глубина 350 мкм.

Результаты полного факторного эксперимента по исследованию микротвердости поверхностных слоев после ИИО представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты исследований микротвердости после ИИО

Номер	h	s	n	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV _{sr}
1	25	0,05	630	348	325	373	358	368	354,4
2	350	0,05	630	278	300	275	282	256	278,2
3	25	0,2	630	333	343	348	338	304	333,2
4	350	0,2	630	249	278	235	282	208	250,4
5	25	0,05	1000	316	304	304	293	278	299
6	350	0,05	1000	271	271	238	296	230	261,2
7	25	0,2	1000	348	304	338	325	312	325,4
8	350	0,2	1000	265	233	259	275	225	251,4

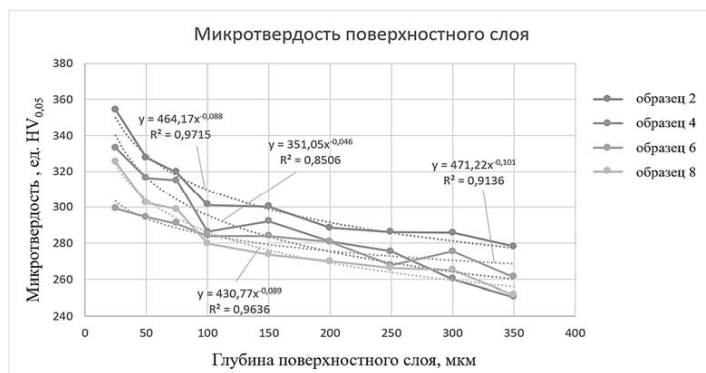


Рис. 2. Распределение микротвердости HV_{0,05} по сечению образцов с исходной шероховатостью Ra_i = 6,3 мкм

Из рисунка видно, что микротвердость имеет тенденцию к асимптотическому приближению к микротвердости исходного материала, при этом показатели степенных трендов приближающей зависимости имеют близкие значения и отражают общую тенденцию.

Вероятно, такие результаты определяются значительными пластическими деформациями микрорельефа поверхности с большим размахом микронеровностей и, соответственно, меньшей величиной относительной опорной длины профиля.

Из рис. 3 видно, что у образцов, имевших исходную шероховатость Ra_i = 1,98 мкм, соответствующие значения микротвердости имеют заметный статистический разброс и изменение тренда микротвердости не столь велико.

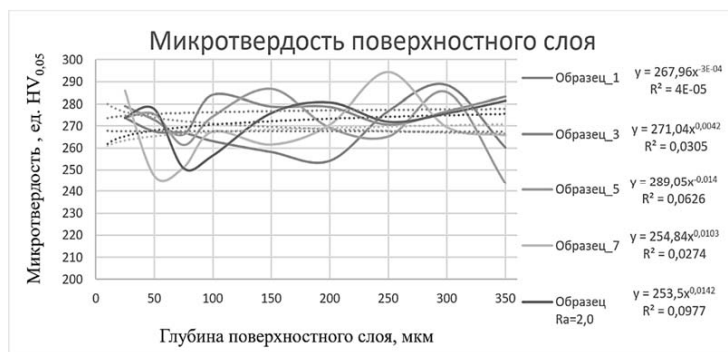


Рис. 3. Распределение микротвердости HV_{0,05} по сечению образцов с исходной шероховатостью Ra_i = 1,98 мкм

развитию вероятностных методов. Наиболее известным из этих методов является вероятностная дорожная карта или метод PRM.

При методе PRM на этапе планирования находятся N случайных точек, которые лежат в свободном пространстве. Каждая точка соединена со своими ближайшими соседями прямым путем, не пересекающим никаких препятствий, чтобы создать сеть или граф с минимальным количеством непересекающихся компонентов и без циклов. Преимущество PRM заключается в том, что необходимо проверить относительно небольшое количество точек, чтобы убедиться, что точки и пути между ними свободны от препятствий. Примеры графиков, созданных при планировании методом PRM, показаны на рис. 2. Точки представляют собой случайно выбранные места, а линии – пути без препятствий.

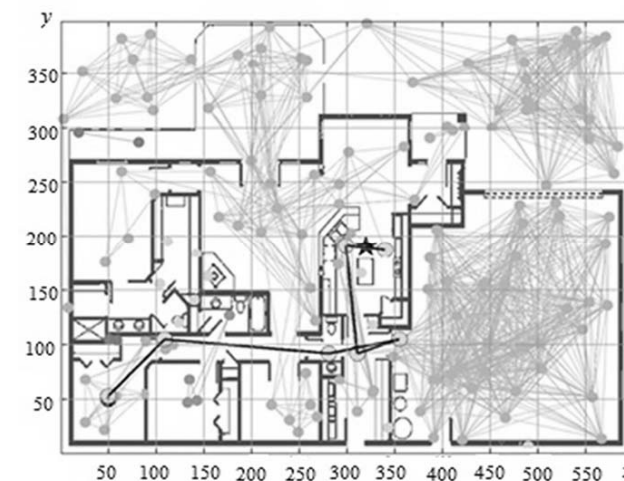


Рис. 2. Планировщик вероятностных дорожных карт (PRM) и графики, созданные на этапе планирования

Для фазы запроса, формирующей путь от начальной точки к цели с минимальной стоимостью, в методе PRM предоставляется начальная и конечная позиция робота. После создания дорожной карты на этапе планирования можно изменить цель и отправные точки, при этом нужно только повторить этап запроса.

Однако следует учитывать, что каждый раз при запуске планировщика создается другая дорожная карта, что приводит к различным путям и длинам. Планировщик может потерпеть неудачу, создав сеть, состоящую из непересекающихся составных частей. В то же время длинные узкие промежутки между препятствиями вряд ли будут использоваться, поскольку вероятность случайного выбора точек, лежащих вдоль таких пространств, очень мала.

Рассмотренные ранее планировщики генерировали пути, независимые от движения, которые робот действительно может достичь. Альтернативой является проектирование пути с самого начала, по которому может следовать мобильный робот.

Как правило, робот перемещается между дискретными точками в пространстве. Первоначально робот находится в исходной точке и может двигаться вперед к трем точкам, показанным на рис. 3, а. В конце каждой ветви пути добавляется один и тот же набор из трех движений, соответствующим образом повернутых и перемещенных (рис. 3, б). В результате получается граф, содержащий большое количество узлов и путей. За счет увеличения количества итераций можно заполнить больше возможных путей.

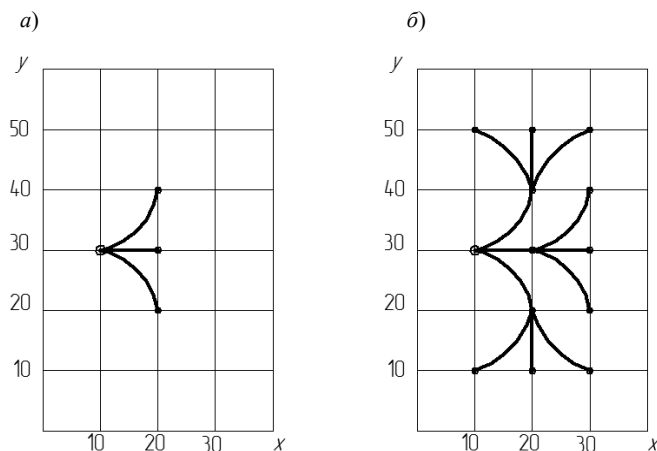


Рис. 3. План решетки после одной и двух итераций

После создания решетки можно вычислить оптимальный путь между любыми двумя узлами, используя метод запроса.

Если стоимость перемещения по трем вариантам управления (прямо, повернуть налево и повернуть направо) равна, то можно получить путь, показанный на рис. 4, а. А если стоимость перемещения по дуге увеличить, то получится путь, показанный на рис. 4, б, который имеет меньше поворотов. Однако путь длиннее – пять, а не четыре сегмента.

Пути, сгенерированные планировщиком простых решеток, могут управляться роботом, но возникают проблемы с движением по диагонали. При наличии препятствий в окружающей среде планировщик будет генерировать непрерывную последовательность резких левых и правых поворотов, которых можно избежать, используя более усовершенствованную версию планировщика решеток, основанную на построении пути с помощью сотни дуг вместо трех.

После поведения ИИО из заготовок вырезались сегменты размером около 10×10 мм, которые затем автоматическим прессом Metkon Ecompress 100 запрессовывались в полимере. После запрессовки по стандартной методике проводилась подготовка образцов для измерений микротвердости. Доводка (предварительное шлифование с последующей полировкой исследуемого среза до зеркального блеска) велась на шлифовально-полировальном станке FORCIPOL202. После подготовки образцов проводились измерения микротвердости поверхностного слоя на универсальном микротвердомере AFFRI URBV-VRS.

Измерение микротвердости по глубине образцов производилось согласно требованиям методики, приведенной в ГОСТ 2999–75, путем вдавливания алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец и измерения диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности после снятия нагрузки. Угол при вершине между противоположными гранями пирамиды наконечника составлял 136° . К алмазному наконечнику прикладывали нагрузку 0,4905 Н в течение 15 с.

У каждого образца на глубинах 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350 мкм от обработанной поверхности проводилось по пять-восемь измерений. Далее, на основе критерия Диксона, из полученных измерений выбирались серии из пяти отсчетов, не содержащие промахов. За величину микротвердости поверхности на исследуемой глубине принимались средние значения по серии проведенных на данной глубине измерений. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 1.

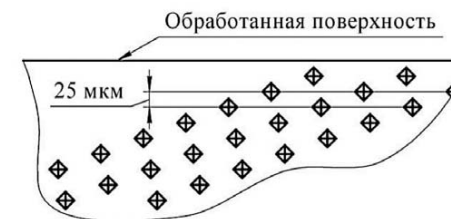


Рис. 1. Схема измерения микротвердости поверхностного слоя по глубине

Анализ полученных средних значений величин микротвердости показал, что на результаты ИИО в значительной мере влияет исходное состояние поверхности.

Измеренные значения свидетельствуют, что результаты ИИО распадаются на две группы, имеющие принципиально различные свойства.

Представленные ниже графики демонстрируют, что наилучший результат при ИИО получен на образцах 2, 4, 6, 8, имевших исходную шероховатость $Ra_i = 6,3$ мкм (рис. 2).

УДК 621.787.6

В. М. ПАШКЕВИЧ, д-р техн. наук, проф.**В. В. АФАНЕВИЧ****А. В. ТЮРИНА**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**Аннотация**

Представлены результаты инерционно-импульсной обработки и ее влияние на микротвердость поверхностного слоя внутренних цилиндрических поверхностей. В качестве материала деформирующих шаров использована закаленная сталь ШХ15, в качестве обрабатываемого материала – специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Представлена эмпирическая модель микротвердости при инерционно-импульсной обработке.

Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, микротвердость, поверхностный слой, эмпирическая модель.

Износостойкость пар трения существенным образом определяется микротвердостью их поверхностных слоев. Этот показатель поверхностного слоя формируется, как правило, на заключительном этапе обработки, в том числе с использованием инерционно-импульсного раскатывания. Приводится анализ его влияния на микротвердость обработанной поверхности.

Экспериментальные исследования влияния режимов (осевой подачи инструмента за один оборот заготовки, частоты ее вращения) инерционно-импульсной обработки (ИИО), а также исходной шероховатости поверхности заготовки на микротвердость обработанной поверхности проводились с использованием токарно-винторезного станка модели 16К20ПФ1 в следующем порядке.

В качестве материала заготовки использовался специальный высокопрочный чугун с механическими характеристиками, близкими к чугуну марки ВЧ60. При проведении исследований было принято допущение, что факторами, оказывающими влияние на микротвердость обработанной поверхности, являются глубина упрочненного поверхностного слоя, подача инструмента за оборот заготовки и частота ее вращения (шпинделя станка), которая определяет требуемую скорость деформирующего шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности. Перед началом ИИО заготовки были предварительно обработаны при базировании в трехкулачковом патроне (растачивались до размера $\varnothing 79,8^{+0,1}$ мм). На втором технологическом переходе заготовка без переустановки подвергалась окончательному растачиванию до размера $\varnothing 80_{-0,1}$ мм с режимами резания, позволяющими получить требуемую исходную шероховатость обработанной поверхности. Заготовки при этом были разделены на две группы: со средней величиной исходной шероховатости по параметру $Ra = 1,984$ мкм (интервал измеренных значений – $1,82 \dots 2,26$ мкм) и $Ra = 6,413$ мкм (интервал – $5,83 \dots 7,24$ мкм).

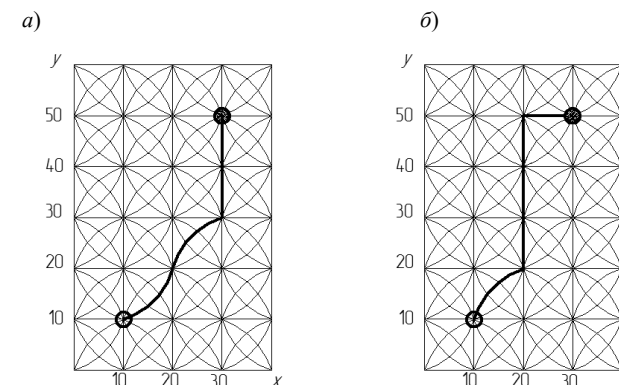


Рис. 4. Пути на решетчатом графе: *a* – с единой стоимостью; *b* – с повышенными затратами за повороты

Каждый из рассмотренных выше методов управления имеет как достоинства, так и недостатки. Некоторые методы плохо подходят для систем реального времени, т. к. имеют низкое быстродействие. Иные методы имеют низкую точность управления, либо сложны в реализации. Некоторые методы сложны для понимания человеком.

На основе изучения методик проектирования траекторий перемещения роботов планируется разработка методов и алгоритмов для управления движением мобильного робота Robotino.

Контакты:

MarinaMN16@mail.ru (Миронова Марина Николаевна);
vera.tsaranok@mail.ru (Царанок Вероника Витальевна).

M. N. MIRONOVA, V. V. TSARANOK**ALGORITHMS FOR CONTROLLING THE MOVEMENT OF A MOBILE ROBOT****Abstract**

The issues of motion control of a mobile robot are considered. Algorithms for planning the trajectory of its movement are given.

Keywords:

mobile robot, trajectory planning, control.

УДК 621.7

А. А. МОГУЧЕВА, канд. техн. наук

Д. В. ГРИНЁВ, канд. техн. наук

С. И. ДМИТРИЕВ, канд. техн. наук, доц.

Е. А. ЕВГЕНЬЕВА

Псковский государственный университет (Псков, Россия)

ПЕРЕДОВАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТАНКОСТРОЕНИИ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА

Аннотация

Приведена информация о создании, структуре и плане работ Передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства.

Ключевые слова:

передовые инженерные школы, программа развития, гибридные технологии в станкостроении, сетевые образовательные программы.

Федеральный проект «Передовые инженерные школы» (ПИШ) был разработан на основе одной из 42 стратегических инициатив, утвержденных Председателем Правительства Российской Федерации, и стал частью государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». Проект направлен на обеспечение квалифицированными кадрами высокопроизводительных экспортоориентированных секторов экономики страны. Ответственность за его реализацию возложена на Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Передовые инженерные школы имеют особое значение для формирования технологического суверенитета и обеспечения российской экономики критически важными технологиями.

Проект стартовал в 2022 г. Сегодня его участниками являются 30 университетов из 15 регионов России. Напомним, что всего было подано 89 заявок из 40 регионов России.

В 2022 г. грантовая поддержка вузов-победителей конкурсного отбора на размещение инженерных школ со стороны государства составила 2,5 млрд р., ещё около 4 млрд р. будет направлено технологическими партнёрами.

Критериями оценки программ развития ПИШ согласно Постановлению Правительства РФ № 619 от 8 апреля 2022 г. являются:

- амбициозность целей и результатов реализации программы развития ПИШ;
- академическое признание и потенциал университета;
- степень проработки и обоснованности программы развития;
- система управления передовой инженерной школы;
- объем внебюджетных средств.

Программа развития ПИШ реализуется до 2030 г. При этом Федеральное финансирование осуществляется только первые три года. Остальные годы – за счет привлечения средств промышленных партнеров и регионов.

Контакты:

office@belaz.minsk.by (Никифорович Сергей Олегович);

vlati@tut.by (Антонюк Владимир Евгеньевич);

sand_work@mail.ru (Сандомирский Сергей Григорьевич).

S. O. NIKIFOROVICH, V. E. ANTONYUK, S. G. SANDOMIRSKI

OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF RING ROLLING PRODUCTION IN BELARUS

Abstract

Automated ring rolling line for machine building products is a complex and expensive technical solution. To organise the operation of the line with maximum efficiency it is necessary to ensure production of rings of different shapes from different steel grades, different temperature range of plastic deformation and with different production programmes. This requires the use of different ratio of radial and axial forces of ring rolling, different technological equipment, taking into account different rigidity of rings and their tendency to deformation during processing, transport and cooling, development of mechanisation means for changeovers. It is impossible to work out in advance all technological options for the production of rings on an automated line. For its provision it is necessary to develop technological and software of processes of manufacturing of each ring, to provide possibility of adjustment of technological processes of the automated line with participation of operators. On this basis the tasks of technological support of effective operation of the ring rolling complex at the Belarusian Automobile Plant are set.

Keywords:

ring billet, heating, pressing, rolling, modeling, plastic deformation.

Выводы. Проведенный анализ состава автоматизированной линии с гибкой связью для изготовления кольцевых заготовок показал, что после приобретения линии необходимо организовать ее работу с максимальной загрузкой и эффективностью. В задачи поставщика решение этих вопросов не входит. Поставленная линия имеет точно заданные параметры. Возможности выбора технологических параметров производства кольцевых заготовок в условиях линии должны быть адаптированы к параметрам оборудования линии и не могут назначаться по справочным рекомендациям. Обычно заранее рассчитывают и задают границы проведения процесса кольцераскатки, но оператор может при необходимости их корректировать. Поэтому надо обеспечить обучение и подготовку квалифицированных операторов для работы на линии и дистанционный сервис с фирмой-поставщиком линии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 188 с.
2. **Антонюк, В. Е.** Особенности термической обработки в автоматизированных комплексах / В. Е. Антонюк, В. В. Рудый, В. В. Яворский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2021. – Вып. 10. – С. 110–112.
3. **Антонюк, В. Е.** Задачи технологического обеспечения автоматизированного кольцераскатного комплекса / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский, В. В. Рудый // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 2 (55). – С. 43–54.
4. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 424 с.
5. Теория прокатки: справочник / Под науч. ред. В. И. Зюзина, А. В. Третьякова. – Москва: Металлургия, 1982. – 335 с.
6. **Puller, S.** Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen mittels elementarer Plastizitätstheorie [Electronic resource] / S. Puller. – Hannover: Universität Diss, 2003. – 110 s. – Mode of access: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6293>. – Date of access: 21.06.2023.
7. **Meier, H.** Mechanisches Deformationsmodell für das Ringwalzen. Zur Berechnung der maximal zulässigen Zentrierarmkräfte beim Radial-Axial-Ringwalzen / H. Meier, A. Pentleit. – Werkstattstechnik wt-online, 2023. – 485 s.
8. **Marchenko, M.** Radial-Axial-Ringwalzen. Dynamische 3D-Visualisierung eines Radial-Axial-Ringwalzprozesses / M. Marchenko. – VDM Verlag Dr. Müller, 2010. – 84 s.
9. **Антонюк, В. Е.** Кольцераскатка в условиях автоматизированного производства / В. Е. Антонюк, П. А. Пархомчик, В. В. Рудый. – Минск: Беларуская навука, 2021. – 245 с.
10. Кольцепрокатные станы. Отличное качество для требовательных заказчиков. – SMS Meer, 2004. – 24 с.
11. **Антонюк, В. Е.** Динамическая стабилизация маложестких колец после кольцераскатки / В. Е. Антонюк, С. Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 3 (52). – С. 28–35.

Операторы проекта «Передовые инженерные школы»:

1) ФГАНУ «Социоцентр» – подведомственное учреждение Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Осуществляет организационно-техническое, информационное, методическое, экспертно-аналитическое сопровождение проекта «Передовые инженерные школы»;

2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Осуществляет экспертно-методическое сопровождение федерального проекта «Передовые инженерные школы».

Последний оператор отвечает за разработку методического и аналитического инструментария для оценки результативности и эффективности деятельности ПИШ, проведение мониторинга достижения результатов и показателей реализации проекта, а также подготовку аналитических материалов о ходе и перспективах реализации проекта. Его основные функции:

- **определение лучших практик** инженерного образования в ПИШ для **тиражирования** в образовательные программы технических университетов Российской Федерации;

- проведение **мониторинга** и подготовка **аналитических материалов** о ходе реализации ПИШ в университетах;

- методическое сопровождение программ повышения квалификации и **стажировок студентов** на базе ПИШ;

- **организация экспертизы** в части формирования реестра экспертов и разработка методик экспертной оценки программ развития ПИШ;

- организация и проведение **ежегодных мероприятий** с представителями ПИШ и индустриальными партнерами.

Псковский государственный университет (далее – ПсковГУ) совместно с Белорусским национальным техническим университетом (далее – БНТУ) стали победителями федерального проекта Минобрнауки.

Созданная на базе этих университетов Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства (далее – ПИШ Союзного государства) начала свою работу в 2022 г. Для обучения в данной школе планируется отбирать наиболее успешных выпускников школ, программ бакалавриата и инженерные кадры предприятий Союзного государства. В настоящее время в ней на программах бакалавриата и магистратуры обучаются более 1000 студентов.

Главная задача ПИШ Союзного государства – подготовка инженеров в отрасли станкостроения, которые смогут решать задачу импортозамещения для обеих стран.

Уникальность созданной школы – в сотрудничестве с Союзным государством. Студенты будут обучаться как в ПсковГУ, так и в БНТУ.

Принципиальная особенность ПИШ Союзного государства – погружение в производственный процесс.

Кроме двух университетов, в проекте участвуют инвестиционные партнеры.

Главный инвестпартнер проекта в Псковской области – ЗАО «Завод электротехнического оборудования» (г. Великие Луки, РФ). Высокотехно-

логичной компанией-партнером проекта выступает ООО «Рухсервомотор» (Республика Беларусь).

С 2023 учебного года запущены сетевые образовательные программы с Белорусским национальным техническим университетом.

Студенты-выпускники программ «Высокоэнергетические технологии обработки деталей» и «Инновационные технологии в машиностроении» получают два диплома о профессиональном образовании – ПсковГУ и БНТУ. На эти программы зачислены студенты Российской Федерации и Республики Беларусь. Также студенты из Беларуси обучаются в рамках дополнительного профессионального образования по программам ПИШ Союзного государства.

Кроме того, совместно с ЗАО «Завод электротехнического оборудования» разработаны две совместные образовательные программы по направлению подготовки «Конструкторское технологическое обеспечение машиностроительных производств».

В структуре ПИШ Союзного государства функционирует целый ряд базовых подразделений, призванных охватить все заявленные направления работы и реализовать двухуровневую модель компетенций. Первый уровень – линейный инженер (выпускник бакалавриата и специалитета). Это инженер-профессионал, готовый и способный к внедрению передовых технологий цифрового производства. Второй уровень – инженер-инноватор (выпускник магистратуры, аспирантуры). Это инженер будущего, готовый разрабатывать новые передовые технологии и оборудование.

Структура ПИШ Союзного государства.

1 Образовательный департамент, включающий:

а) академические отделения:

- отделение инженерных технологий;
- отделение электроэнергетики, электропривода и систем автоматизации;
- отделение информационно-коммуникационных технологий;
- экспериментальную лабораторию интеллектуальных роботизированных систем;

– научно-технологическую лабораторию цифрового прототипирования и реинжиниринга;

– студенческое конструкторское бюро;

б) 21 учебную лабораторию.

2 Научно-производственный департамент, включающий следующие подразделения:

– Российско-Белорусский научно-исследовательский центр гибридных технологий формообразования в станкостроении;

– Научно-исследовательская лаборатория плазменных и лазерных технологий;

– Научно-образовательный центр компьютерного моделирования основных процессов работы станочного оборудования;

– Научно-образовательный центр перспективных систем электроприводов;

– Инжиниринговый центр.

Кольцераскатной стан с механизацией замены инструмента – должен обеспечить выдачу заготовок с заданными технологическим процессом параметрами – формой и температурой, в рамках машинного времени [10].

Система охлаждения – обеспечивает охлаждение заготовок после кольцераскатки до 60 °С. Ее вариант – туннель с вентиляционной системой и конвейером с регулируемой скоростью перемещения.

Экспандеры – предназначены для исправления погрешности колец после кольцераскатки в горячем, полугорячем и холодном состоянии. Для использования экспандера в составе линии требуется определение места его использования и разработка специальной конструкции [11].

Измерительная станция – должна в тактовом времени обеспечить полный контроль размеров холодного кольца, зафиксировать результаты измерения в системе управления линией, дать команду на транспортировку кольца на склад или в брак. Для внесения корректировок в технологический процесс должна иметь обратную связь со всем оборудованием.

Склад готовых колец – в тактовом времени обеспечивает прием годных колец и их складирование в определенном порядке.

Устройства механизации замены и складирования инструмента. Планирование замены инструмента следует совмещать с остановками линии для загрузки участка складирования проката и разгрузки склада готовых колец.

Транспортные средства между всеми видами оборудования линии – обязательны для линии при минимальном времени транспортирования.

Система безопасности – защитные ограждения с блокировкой и контролем дверей для предотвращения нанесения вреда персоналу от автоматически работающих компонентов линии.

Кольцераскатной комплекс с системой ЧПУ позволяет контролировать и управлять изготовлением каждого кольца (рис. 2). С пульта управления контролируют изготовление заготовок по всему технологическому циклу.

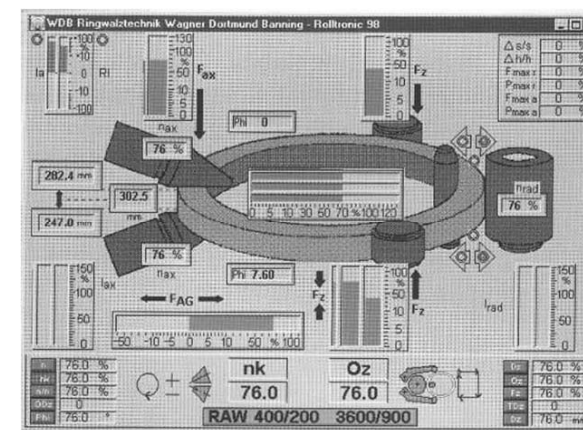


Рис. 2. Экран положения инструмента и заготовки

связью (не синхронные). При создании автоматизированных линий с широкой номенклатурой и с большим диапазоном габаритов кольцевых заготовок целесообразно использовать линии с гибкой связью, включающие такие составные части.

Участок складирования проката – обеспечивает автоматизированное складирование заданной номенклатуры проката с последующей его передачей на участок резки.

Участок резки проката с накопителем отрезанных заготовок (рис.1, *а*) – обеспечивает выдачу отрезанных заготовок для автоматизированной линии в соответствии с заданным тактовым временем. В зависимости от максимального диаметра проката, используемого для работы в автоматизированной линии, выбирается способ и оборудование для резки.

Участок нагрева с устройством удаления окалины (рис. 1, *б*) – обеспечивает нагрев заготовок для автоматизированной линии в соответствии с заданным тактовым временем. Для нагрева проката диаметром более 300 мм используют камерные печи или печи с вращающимся подом. Для удаления окалины используют установки сбива окалины водой.

Пресс с механизацией замены инструмента – обеспечивает выдачу заготовок с заданными по технологическому процессу формой, температурой и машинным временем. Тактовое время автоматизированной линии определяется техническими возможностями пресса.

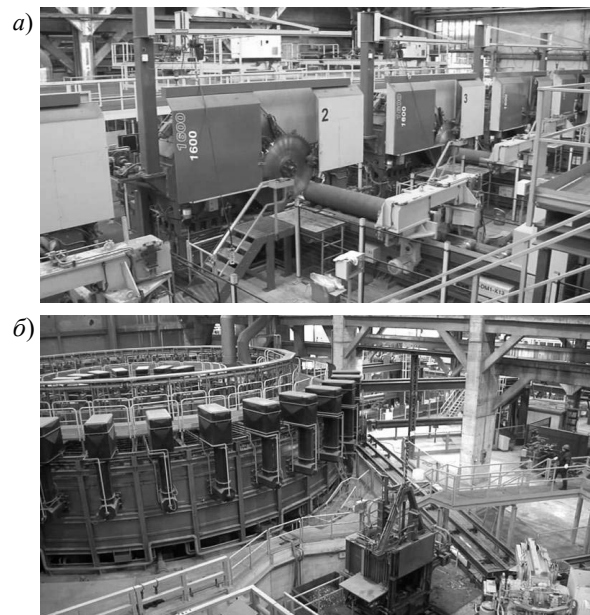


Рис. 1. Участок резки дисковыми пилами (*а*) и печь с вращающимся подом (*б*) в составе автоматизированной линии по изготовлению железнодорожных колес на предприятии Lucchini (Италия)

Планируется, что уже к 2025 г. в результате исследований ПИШ Союзного государства будут разработаны высокотехнологичные приводы мехатронных систем, оборудование и технологии послойной лазерной наплавки и формирования покрытий методами плазменной и лазерной наплавки, лазерного легирования и закалки, появятся новые материалы и технологии их применения для высокотехнологичных приводов, а также цифровые двойники приводов мехатронных систем.

Контакты:

mogucheva.a@pskgu.ru (Могучева Анна Алексеевна);

grinev.d@pskgu.ru (Гринев Дмитрий Владимирович);

dmitrievsi55@gmail.com (Дмитриев Сергей Иванович);

zhen_sheny@mail.ru (Евгеньева Евгения Анатольевна).

A. A. MOGUCHEVA, D. V. GRINEV, S. I. DMITRIEV, E. A. EVGENIEVA

ADVANCED ENGINEERING SCHOOL OF HYBRID TECHNOLOGIES IN MACHINE BUILDING OF THE UNION STATE

Abstract

Information is provided on the creation, structure and work plan of the Advanced Engineering School of Hybrid Technologies in Machine Tool Industry of the Union State.

Keywords:

advanced engineering schools, development program, hybrid technologies in machine tool industry, network educational programs.

УДК 621.81

С. О. НИКИФОРОВИЧ¹**В. Е. АНТОНЮК**², *д-р техн. наук, проф.***С. Г. САНДОМИРСКИЙ**², *д-р техн. наук, доц.*¹ ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»

(Жодино, Беларусь)

² Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)**ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ КОЛЬЦЕРАСКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В БЕЛАРУСИ****Аннотация**

Автоматизированная линия кольцераскатки заготовок изделий машиностроения является сложным и дорогим техническим решением. Для организации работы линии с максимальной эффективностью необходимо обеспечить производство колец разной формы из разных марок сталей, разным температурным диапазоном пластического деформирования и с разными программами выпуска. Это требует использования разного соотношения радиальных и осевых усилий кольцераскатки, разного технологического оснащения, учета разных жесткости колец и их склонности к деформациям при обработке, транспортировке и охлаждении, разработки средств механизации для переналадок. Заранее отработать все технологические варианты производства колец на автоматизированной линии невозможно. Для его обеспечения необходимо разработать технологическое и программное обеспечение процессов изготовления каждого кольца, предусмотреть возможность корректировки технологических процессов автоматизированной линии с участием операторов. На этой основе поставлены задачи технологического обеспечения эффективной работы кольцераскатного комплекса на Белорусском автомобильном заводе.

Ключевые слова:

кольцевая заготовка, нагрев, прессование, раскатка, моделирование, пластическое деформирование.

Введение. Высокая точность и механические свойства – достоинства создания ответственных деталей машиностроения с использованием кольцераскатки [1]. В Европе работает более 30 кольцераскатных линий. Из них только две линии являются автоматизированными (для производства заготовок подшипников в компании «OVAKO» (Швеция) с диаметром колец D до 1200 мм и на Минском подшипниковом заводе с D до 600 мм) [1]. Белорусский автомобильный завод создает автоматизированный комплекс производства кольцевых заготовок с D до 3000 мм. По показателям (уровню автоматизации и параметрам кольцевых заготовок) он станет самым современным в Европе.

Для улучшения механических свойств и структуры заготовок, улучшения их обрабатываемости резанием заготовки надо термически обработать. Поэтому в состав комплекса на БЕЛАЗе войдет и автоматизированный участок термической обработки заготовок после кольцераскатки. Предусмотрены нормализация, отжиг, изотермический отжиг и улучшение (закалка с высоким отпуском) [2]. Создаваемый комплекс производства кольцевых заготовок

удовлетворит не только потребность в них белорусских предприятий, но обеспечит и их поставку в Российскую Федерацию.

После приобретения автоматизированной линии надо организовать ее работу с максимальной эффективностью и загрузкой [3]. Но поставщики оборудования для кольцераскатки не делятся опытом его эксплуатации. Поэтому, кроме закупки оборудования, необходима разработка научных основ технологии кольцераскатки применительно к задачам создаваемого в Республике Беларусь автоматизированного кольцераскатного комплекса.

Цель доклада – на основе анализа состава и возможностей оборудования автоматизированной кольцераскатной линии и технологических процессов кольцераскатки поставить задачи технологического обеспечения эффективной работы кольцераскатного комплекса на Белорусском автомобильном заводе.

Технологические основы кольцераскатки. Кольцераскатка использует положения пластического деформирования металла [4, 5], которое начинается с теплового преобразования его свойств [6]. Деформирование нагретого металла проводят на кузнечно-прессовом оборудовании. При кольцераскатке деформирование и течение металла аналогично процессу прокатки. При правильном выборе схемы течения металла и соотношения усилий деформирования и пластичности можно достичь улучшения структуры металла и механических свойств детали. Перспективным процессом пластического деформирования является многократное нагружение: радиальная и радиально-осевая кольцераскатки [7, 8].

В автоматизированной линии последовательно выполняют операции резки, нагрева, пластической деформации на прессе и кольцераскатном стане, контроля, перемещения, охлаждения, маркировки. Заготовки находятся при температурах от 1250 °С до холодного состояния 60 °С. Они подвергаются деформации как при обработке, так и при перемещении и охлаждении. По сечению используют как прямоугольный профиль, так и изготовление колец со сложным профилем на наружном и внутреннем диаметрах.

Особенности автоматизированных кольцераскатных производств [9].

Обычно при изготовлении кольцевых заготовок на *автоматизированных линиях* предусмотрено участие оператора при выполнении разных операций обработки. Использование опыта создания автоматизированных производств железнодорожных колес при создании автоматизированного производства обычных кольцевых заготовок невозможно, т. к. для загрузки такой линии требуется обеспечить производство на этой линии колец разного размера и формы сечения, из сталей с разным температурным диапазоном пластического деформирования, с разной жесткостью и разной склонностью к деформациям в процессе обработки, транспортирования и охлаждения, с разными годовыми программами выпуска. Заранее отработать все технологические варианты производства разных размеров колец на автоматизированной линии невозможно. Поэтому в требованиях по созданию линии надо предусмотреть использование программного обеспечения как для создания технологических процессов изготовления каждого кольца, так и для корректировки технологических процессов непосредственно на линии с участием операторов.

По условиям совместной работы оборудования в составе автоматизированной линии следует различать линии с жесткой связью (синхронные) от линий с гибкой