
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№ 3(15)
2019

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2019» (9 – 13 сентября 2019 года)*

Севастополь 2019

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШЕВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯКУБОВ Ф.Я.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Чернышов М.О. Формирование условий максимальной обрабатываемости при обработке жаропрочных материалов	4
Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Анализ подходов к оценке надежности технических систем	9
Войку И.П., Комиссаров И.А. Двусторонняя летне-зимняя автомобильная шина: преимущества и перспективы промышленного производства	17
Левченко Е.А., Братан С.М., Колесов А.Г. Математическое моделирование процесса обработки деталей с использованием вибраций	22
Байков Ю.А., Петров Н.И., Тимошина М.И., Акимов Е.В. О микрокристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов в диффузионно-релаксационном режиме	26
Перетягин Н.Ю., Пристинский Ю.О., Перетягин П.Ю. Влияние температуры искрового плазменного спекания на механические свойства боркарбидных композитов, упрочненных графеном	31
Шутиков М.А., Феофанов А.Н. Внедрение системы автоматизированного расчета производственного расписания измерительного оборудования совместно со станочным парком	36
Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Федоров А.В. Исследование процесса удаления заусенца при вибрационной обработке деталей радиоэлектронной аппаратуры	41
Новоселов Ю.К., Богуцкий В.Б. Анализ влияния изменений параметров состояния технологических систем на выходные переменные операций шлифования	47
Харченко А.О., Владецкая Е.А. Стратегия управления операцией шлифования в автоматизированном производстве	54
Умеров Э.Д., Абдулгазис Д.У. Управление динамической системой процесса глубокого сверления	61
Пушилина Н.С., Кудияров В.Н., Сыртанов М.С. постобработка титановых сплавов, изготовленных с помощью аддитивных технологий	70

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

Chief Editor D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.	
Associate Editor in Chief Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.	
Scientific Editor D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.	
Executive Secretary Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.	
Editorial team	
ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHEV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc. Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Artamonov E.V., Vasil'ev D.V., Chernyshov M.O. Formation of the conditions of maximum processability when treating heat-resistant materials.....	4
Shiriaeva E.N., Polyakova M.A. Analysis of the approaches to the estimation of technical systems' dependability	9
Voiku I.P., Komissarov I.A. Double-sided summer-winter car tire: advantages and prospects of industrial production	17
Levchenko E.A., Bratan S.M. Kolesov A.G. Mathematical modeling of the process of processing parts using vibrations	22
Baikov Yu.A., Petrov N.I., Timoshina M.I., Akimov E.V. On microcrystallization 50% two-component metal melts in the diffusive-relaxation procedure.....	26
Peretyagin N.Y., Pristinsky Y.O., Peretyagin P.Y. Influence of spark plasma sintering temperature on mechanical properties of boron carbide composites reinforced graphene.....	31
Shutikov M.A., Feofanov A.N. Implementation of automated system of calculation of industrial schedule of measuring equipment together with the machine park....	36
Tamarkin M.A., Kolganova E.N., Fedorov A.V. Investigation of the process of removing a burr at vibration treatment of details of radio electronic equipment.....	41
Novoselov Yu.K., Bogutsky V.B. analysis of the impact of changes in the parameters of the condition of technological systems on output variables of the grinding operations	47
Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. Control operation strategy of grinding in automated manufacturing	54
Umerov E.D., Abdulgazis D.U. Control of dynamic process system deep hole drilling.....	61
Pushilina N.S., Kudiurov V.N., Syrtanov M.S. Treatment of titanium alloys, manufactured by additive technologies	70

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 621.9

ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. Артамонов¹, Д. В. Васильев¹, М.О. Чернышов¹¹ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В работе применяется научная гипотеза о том, что температура максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов соответствует температуре высокотемпературного охрупчивания. Изложены новые разработанные методики определения условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов.

Ключевые слова: обрабатываемость, стружкообразование, высокотемпературное охрупчивание.

FORMATION OF THE CONDITIONS OF MAXIMUM PROCESSABILITY WHEN TREATING HEAT-RESISTANT MATERIALS

E.V. Artamonov¹, D. V. Vasil'ev¹, M.O. Chernyshov¹¹Tyumen Industrial University ", Tyumen, Russian Federation

Abstract

This paper applies the scientific hypothesis that the temperature of the maximum workability of heat-resistant materials corresponds to the temperature of high-temperature embrittlement. Newly developed methods for determining the conditions of maximum workability of heat-resistant materials are presented.

Keywords: machinability, chip formation, high-temperature embrittlement.

Нефтедобывающее оборудование работает в тяжелых условиях: высокие нагрузки, высокие температуры, абразивы в виде кварцевого песка, пары кислот и другие воздействия. В связи с этим наиболее ответственные детали изготавливаются из специальных нержавеющих сталей, жаропрочных сплавов на основе никеля с высокими прочностными характеристиками и коррозионной стойкостью, типа alloy K-500, alloy 625, alloy 718.

На первом этапе транспортировки, подъема скважинной жидкости (флюида) из скважины на поверхность нефтепродуктов предприятиями нефтегазового комплекса применяют электроцентробежные насосы (рис. 1).

Базовой деталью каждого модуля погружного электроцентробежного насоса является вал, выполненный из стали alloy K-500 [14].

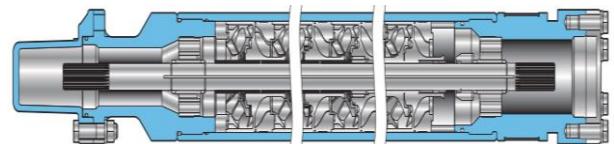


Рис. 1. Электроцентробежный погружной насос TPS-Line pump фирмы Schlumberger

Современным машиностроительным производством наработан большой экспериментальный материал по определению оптимальных режимов резания при обработке деталей из сталей разных групп обрабатываемости, который положен в основу справочных данных.

В связи с санкционной политикой в отношении России возник дефицит зарубежных сталей марок alloy K-500, alloy 625, alloy 718, поэтому металлообрабатывающие предприятия вынуждены перейти на такие новые запатентованные отечественные марки сталей как: 05X16M4Д2Б, 03X14Н7В по ТУ14-1-5518-2005 с пределом прочности до

160 кгс/мм²; 8ХГМФТ по ТУ14-1-5556-2007 (буровая) с пределом прочности до 120 кгс/мм²; сталь 4340, в России обозначение 36Х2Н2МФА сталь конструкционная, легированная, предел прочности до 120 кгс/мм².

Определение режимов максимальной обрабатываемости таких сталей по прежнему является большой проблемой [1], [2]. Для определения этих режимов резания, необходимы продолжительные дорогостоящие стойкостные лабораторные испытания [3], [4], [5], [6], обусловленные большой трудоемкостью работы, приводящие к определённым финансовым затратам, а также к потере времени [7], [9], [10], [12].

Поэтому, по нашему мнению, одним из методов решения сформулированной задачи является формирование условий максимальной обрабатываемости специальных нержавеющих сталей, сплавов на основе никеля с высокими прочностными характеристиками и коррозионностойкими свойствами путём управления температурой резания через изменение скорости резания, по виду и коэффициенту сплошности стружки [8].

Для решения этой задачи был проведён анализ справочных данных зависимостей механических характеристик (δ , ψ) (рис. 2), обрабатываемых жаропрочных сталей от температуры, который показал, что эти стали и сплавы склонны к высокотемпературному охрупчиванию [13], обуславливаемым минимальным значением составляющей силы резания P_z и потребляемой мощности при резании, минимальным значением относительного поверхностного износа по задней поверхности режущего лезвия инструмента $h_{ПЗmin}$, обуславливающим максимальную обрабатываемость материалов, изменением вида стружки из сливной в элементную, уменьшением коэффициента сплошности стружки k_s до минимальных значений.

Для доказательства данного предположения в лаборатории резания металлов ТИУ, ИПТИ, кафедры «СИ» были проведены стойкостные испытания при черновой обработки стали 05Х16М4Д2Б по ТУ14-1-5518-2005 с пределом прочности до 160

кгс/мм², результаты которых показали явную зависимость вида стружки от температурно-скоростного фактора как представлено в таблице 1.

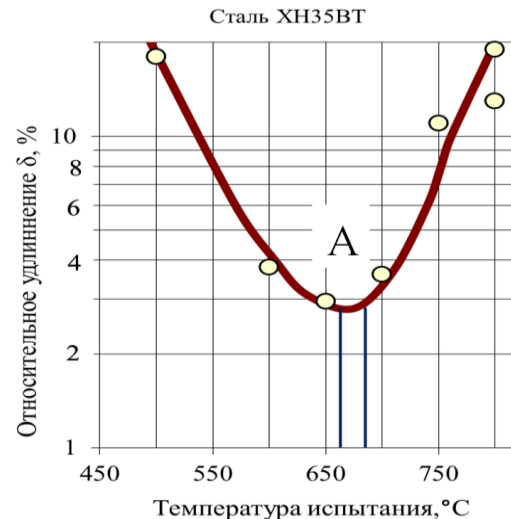


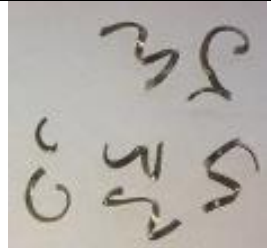
Рис. 2. Зависимость механических характеристик сталей от температуры

Для доказательства данного предположения в лаборатории резания металлов ТИУ, ИПТИ, кафедры «СИ» были проведены стойкостные испытания при черновой обработки стали 05Х16М4Д2Б по ТУ14-1-5518-2005 с пределом прочности до 160 кгс/мм².

Результаты кратковременных стандартных испытаний при резании показали зависимость вида стружки от температуры резания, а именно с повышением скорости и температуры резания переход от одного вида стружкообразования к другому происходит дважды: сначала (при низких температурах) (до 500° - 600°) элементная стружка, характеризующаяся такими параметрами, как угол наклона плоскости сдвига (скола) элемента – ϕ_k , толщина стружки или высота элемента – a_1 , высота сплошного участка стружки – a_2 , толщина элемента – b_1 , шаг элементов – m , [11] переходит в сливную с основными характеристиками: коэффициентом усадки стружки ξ и углом наклона условной плоскости сдвига – ϕ_k , дальнейшее повышение температуры ($\approx 750^\circ - 800^\circ$) вызывает обратный переход сливной стружки в элементную [13], (таблица 1).

Таблица 1. Изменение видов стружки при обработке стали 05X16M4Д2Б, резцом из твердого сплава BK8 $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $S=0,43$ мм/об в зависимости от скорости и температуры резания


$v = 11$ м/мин, $\theta < 550^\circ$, Сливная

$v = 43,5$ м/мин, $\theta = 780^\circ$, Суставчатая

$v = 90$ м/мин, $\theta = 955^\circ$, Элементная

Экспериментальные данные показали хорошую корреляцию с результатами экспериментов работ [9], [10], [15] и полностью подтвердили диаграмму, представленную профессором Полетикой М.Ф. (рис. 3) [10], [12].

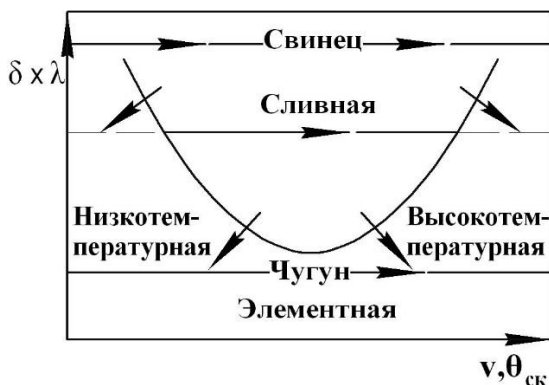


Рис. 4. Диаграмма профессора Полетика М.Ф.

Таким физическим явлением как высокотемпературное охрупчивание можно пользоваться при создании условий дробления стружки. По рисунку 2, видно, что мак-

симальный эффект охрупчивания для сплава ХН35ВТ имеет место при определённой температуре равной 650 - 700 °С. Этот температурный диапазон и необходимо создавать в процессе резания.

Для наглядности строят общий график зависимостей силы резания P_z , усадки стружки ξ и температуры резания θ от скорости резания V (рис. 4.).

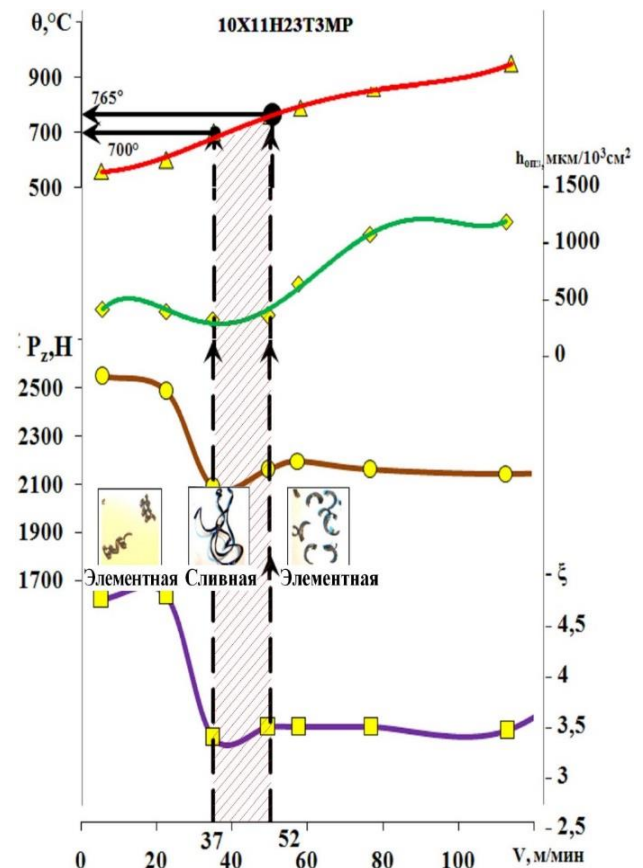


Рис. 4. Зависимости температуры резания $\theta, ^\circ\text{C}$, относительного износа по задней поверхности $h_{\text{опз}}$ (мм), силы резания P_z , коэффициента усадки стружки ξ , от скорости резания V (м/мин) при обработке стали 10X11H23T3MP

Выводы

1. Применяя такое физическое явление, как температурное охрупчивание, решается задача дробления стружки жаропрочных материалов, при обработке резанием ответственных деталей нефтедобывающего оборудования;
2. Наглядно видно практическое соответствие оптимальной температуры резания температуре, при которой стружка из слив-

ной переходит в элементную.

3. Применение предлагаемого способа определения оптимальной скорости резания позволяет сократить станко-часы и трудоемкость определения оптимальной скорости резания, расход обрабатываемого материала, так как эксперимент можно проводить в заводских условиях на реальных деталях нефтедобывающего оборудования.

Список литературы

1. Адаскин, А.М. Влияние скорости резания на стружкообразование при точении жаропрочных сплавов на основе хрома и никеля. / А.М. Адаскин, В.Н. Бутрим, А.А. Верещака, А.С. Верещака, В.В. Каширцев // СТИН. 2014. № 10. С. 23-27.
2. Артамонов, Е.В. Работоспособность инструментов и физико-механические характеристики инструментальных твердых сплавов и обрабатываемых материалов. / монография / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, М.С. Остапенко, В.А. Шрайнер Под общей ред. М.Х. Утешева. – Тюмень: Изд. «Вектор Бук», 2008. – 160 с.: рис., табл. – Библиогр.: с. 143-157. – ISBN 978-5-91409-092-7.
3. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. / В.Ф. Бобров - М.: Машиностроение, 1975. - 344с.
4. Васин, С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 448 с.
5. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с.: ил.
6. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. / А.Д. Макаров, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
7. Мокрицкий, Б.Я. Повышение эффективности стружкообразования при колесотокарной обработке / Б.Я. Мокрицкий, В.В. Алтухова, П.А. Саблин // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 2. С. 33-38.
8. Патент РФ №142320 Российская Федерация, МПК G01K7/00. Устройство для тарирования естественной термопары, измерения сил резания и температуры в процессе резания / Артамонов Е.В., Васильев Д.В.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет (RU). - № 2013131205/28; заявл. 08.07.2013; опубл. 27.06.2014 Бюл. №18.
9. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев – учеб.

пособие для вузов. - М.: «Высш. школа» 1974. – 587 с.:ил.

10. Полетика М.Ф. Теория резания, ч. 1. Механика процесса резания. Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2001 г.
11. Розенберг Ю.А. Методы аналитического определения степени деформации металла стружки при резании // Вестник машиностроителя, - 2001.- №3.-С. 34-38.
12. Силин, С.С. Метод подобия при резании металлов. / С.С. Силин - М.: Машиностроение, 1979.- 152с.
13. Artamonov, E.V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip/ E.V. Artamonov, D.V. Vasil'ev. // Russian Engineering Research. – 2014, Volume 34, Issue 6, pp 404-405. https://www.slb.ru/upload/iblock/8c4/tps_line_esp-booklet_rus.pdf
14. Kus A., Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting/ A Kus, Y Isik, M Cakir, S Coşkun, K Özdemir.// Sensors (Switzerland) - 2015 vol: 15 (1) pp: 1274-1291.

References

1. Adaskin, A.M. Influence of cutting speed on chip formation during the grinding of superalloys based on chromium and nickel. / A.M. Adaskin, V.N. Butrim, A.A. Vereshchak, A.S. Vereshchak, V.V. Kashircev // STIN. 2014. № 10. P. 23-27.
2. Artamonov, E.V. The efficiency of tools and the physico-mechanical characteristics of instrumental hard alloys and materials to be processed. / monograph / E.V. Artamonov, D.S. Vasilega, MS Ostapenko, V.A. Schreiner, Under General Ed. M.H. Uteshev. - Tyumen: Ed. "Vector Book", 2008. - 160 pp.: Fig., Table. - Bibliogr.: p. 143-157. - ISBN 978-5-91409-092-7.
3. Bobrov, V.F. Fundamentals of the theory of cutting metals. / V.F. Bobrov - M.: Mashinostroenie, 1975. -344c.
4. Vasin, S.A. Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of interconnections when cutting: a textbook for technical universities. / S.A. Vasin, A.S. Vereschaka, B.C. Kushner - M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. - 448 p.
5. Grigoriev S.N. Methods to improve the resistance of the cutting tool: a textbook for university students. - M.: Mashinostroenie, 2011. - 368 pp., Ill.
6. Makarov, A.D. Optimization of cutting processes. / A.D. Makarov, 2nd ed. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 278 p.
7. Mokritsky, B.Ya. Improving the efficiency of chip formation during wheel-turning / B.Ya. Mokritsky, V.V. Altukhov, P.A. Sablin // Problems of mechanical engineering and automation. 2013. No. 2. P. 33-38.
8. Patent of the Russian Federation No. 142320 Rus-

- sian Federation, IPC G01K7 / 00. A device for calibrating a natural thermocouple, measuring cutting forces and temperature during the cutting process / Artamonov EV, Vasiliev DV; Applicant and Patentee Tyumen State Oil and Gas University (RU). - № 2013131205/28; declare 07/08/2013; publ. 06/27/2014 Bul.№18.
9. Poduraev, V.N. Cutting of hard-to-cut materials / V.N. Poduraev - studies. manual for universities. - M.: "Higher. School "1974. - 587 p.: il.
 10. Poletika M.F. Cutting theory, part 1. The mechanics of the cutting process. Tutorial. Tomsk: TPU Publishing House, 2001
 11. Rosenberg, Yu.A. Methods of analytical determination of the degree of deformation of metal chips during cutting // Bulletin of the machine builder, - 2001.-№3.-С. 34-38.
 12. Silin, S.S. The method of similarity when cutting metals. / S.S. Silin - M.: M-Shinostroenie, 1979.- 152с.
 13. Artamonov, E.V. The chip / E.V. Artamonov, D.V. Vasil'ev. // Russian Engineering Research. - 2014, Volume 34, Issue 6, pp 404-405.https://www.slb.ru/upload/iblock/8c4/tps_line_esp-booklet_rus.pdf
 14. Kus A., Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting/ A Kus, Y Isik, M Cakir, S Coşkun, K Özdemir.// Sensors (Switzerland) - 2015 vol: 15 (1) pp: 1274-1291.

УДК 621.771

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.Н. Ширяева¹, М.А. Полякова¹

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

Аннотация

Приведена классификация свойств, составляющих эффективность технических систем: надежность, экономичность, безопасность. Проведен сравнительный анализ понятия «надежность» согласно стандартам ГОСТ 27.002 – 2015 и ГОСТ 27.002 – 2009. Показано, что для технических систем и средств технологического оснащения определение надежности интерпретируется по-разному. Отмечено, что оценка надежности действующей технической системы необходима разработки мероприятий по совершенствованию конструкции и прогнозирования ее развития. Поскольку оценка надежности технологической системы осуществляется на стадии ее проектирования, определены основные этапы ее осуществления. Приведена структурная схема технической системы «технологический процесс горячей прокатки листовой стали». Основной целью функционирования данной технической системы является получение горячекатаного листа с заданными свойствами, поэтому оценка ее надежности является важной производственной задачей. Приведены формулы расчета критериев оценки работоспособности для комплексной оценки надежности технической системы.

Ключевые слова: техническая система, надежность, определение, технологический процесс, горячая прокатка, работоспособность.

ANALYSIS OF THE APPROACHES TO THE ESTIMATION OF TECHNICAL SYSTEMS' DEPENDABILITY

E.N. Shiriaeva¹, M.A. Polyakova¹

¹"Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova", Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract

It is given the classification of properties which compile the technical systems' effectiveness: dependability, economical effectiveness, safety. The comparative analysis for the definitions "dependability" in accordance with standards GOST 27.002 – 2015 and GOST 27.002 – 2009 was carried out. It was shown that both for technical systems and means of technological equipment the estimation of dependability was interpreted in different ways. It was stated that estimation of dependability for operated technical system was necessary for its construction improvement and prediction of its development. Because dependability of the technical system is carried out on the stage of its design the basic stages of this procedure were described. The structural scheme of the technical system "steel sheet hot rolling process" was presented. The basic aim of this technical system functioning is to obtain hot rolled steel sheet with preselected set of properties that is why the estimation of this technical system dependability is the important aim for manufacturing process. Calculation formula of working capacity criteria for technical system dependability complex estimation were presented.

Keywords: technical system, dependability, definition, technological process, hot rolling, working capacity.

В настоящее время существует большое количество определений понятия «техническая система», исходя из области исследования или контекста, в котором оно используется. Под технической системой следует понимать конструктивную совокупность взаимодействующих и взаимосвязанных объектов, необходимую для целенаправленных действий для достижения заданного

результата в процессе функционирования. Признаки, которыми отличаются технические системы от систем с произвольным комплексом объектов или от отдельных элементов – это конструктивность (практическая осуществимость отношений между элементами), взаимосвязанность и ориентированность составных элементов, а также целенаправленность. Эффективность тех-

нической системы определяется через ее (рис.1).
надежность, экономичность и безопасность

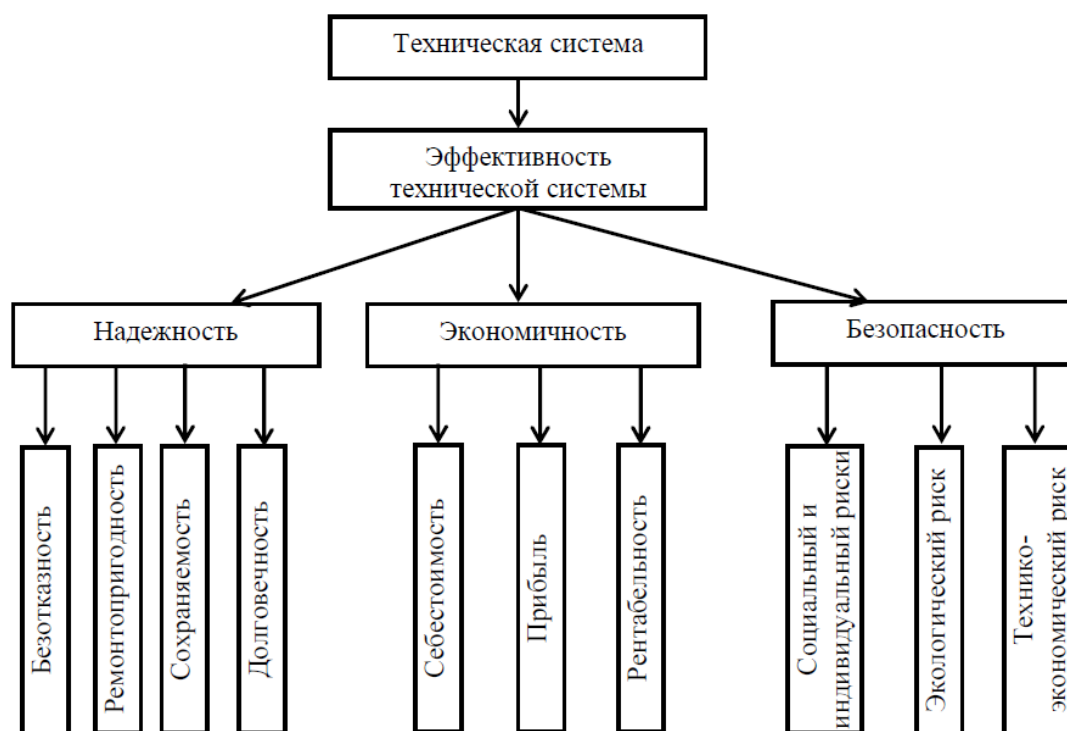


Рис. 1. Основные составляющие эффективности технической системы

Основным и важнейшим показателем, характеризующим свойства технической системы, является ее надежность – свойство сохранения структуры системы, несмотря на выход из строя отдельных ее элементов с помощью их замены или дублирования. Термин «надежность» (dependability) был введен Жан-Клодом Лапри в 1980 году для того, чтобы немного разгрузить широко используемый ранее, и в связи с этим сильно перегруженный в смысловом понимании термин «reliability». Считалось, что термин «dependability» будет использоваться в более широком смысловом диапазоне, например, в таких направлениях, как безопасность информационных технологий, а термин «reliability» – безотказность – будет описывать отказы в системах и элементах. В стандарте ГОСТ Р ИСО 9000-2008 термин «надежность» (dependability) приводится как обобщенный термин, применяемый для

описания свойства готовности и влияющих на него свойств безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта. Термин «надежность» (dependability) применяется только для обобщенного нечисленного описания свойства. Надежность – часть более обширного понятия – качества (quality), определяемое в данном стандарте как степень соответствия совокупности присущих характеристик некоторым требованиям.

Показатели надежности технических систем и средств технологического оснащения следует выбирать из числа установленных в действующих стандартах ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 27.003-90 и ГОСТ 27.004-85 [1]. Сравнительный анализ изменения основных показателей надежности в технике по действующему ГОСТ 27.002 – 2015 и отмененному стандарту ГОСТ 27.002 – 2009 представлены в таблице 1 [2, 3].

Таблица 1. Единичные показатели надежности в технике в соответствии со стандартами

Название показателя	ГОСТ 27.002 – 2015		ГОСТ 27.002 – 2009	
	Определение	Показатели	Определение	Показатели
Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течении некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения	Наработка до отказа, наработка до первого отказа, время между отказами, наработка между отказами, время до восстановления, срок службы, период приработки, период постоянного параметра потока отказов, период постоянной интенсивности отказов, период износных отказов, вероятность безотказной работы, мгновенная интенсивность отказов, средняя интенсивность отказов, мгновенный параметр потока отказов, средний параметр потока отказов, асимптотический параметр потока отказов, средняя наработка до первого отказа, средняя наработка до отказа, средняя наработка между отказами	Способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях	Вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентная наработка до отказа, средняя наработка между отказами, гамма-процентная наработка между отказами, интенсивность отказов, параметр потока отказов
Ремонтопригодность	Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта	Интенсивность восстановления, средняя продолжительность ремонта, среднее значение оперативной продолжительности корректирующего технического обслуживания, среднее время до восстановления, полнота обнаружения неисправностей, полнота ремонта, средняя административная задержка, средняя логистическая задержка, гамма-процентное время до восстановления	Способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию	Вероятность восстановления, среднее время восстановления, среднее время до восстановления, гамма-процентное время восстановления, гамма-процентное время до восстановления, интенсивность восстановления
Долговечность	Свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния	Ресурс, гамма-процентная наработка до отказа, средний срок службы, гамма-процентный срок службы, средний ресурс, гамма-процентный ресурс, остаточный срок службы, остаточный ресурс	Способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания	Средний ресурс, гамма-процентный ресурс, средний срок службы, гамма-процентный срок службы

Продолжение таблицы 1

Сохраняемость	Свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования	Срок сохраняемости, гамма-процентный срок сохраняемости, средний срок сохраняемости	Способность изделия выполнять требуемую функцию в течение и после хранения и (или) транспортирования	Средний срок сохраняемости, гамма-процентный срок сохраняемости
Определение надежности	Свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования		Свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания	

Система обеспечения надежности изделий – это совокупность организационно-технических и экономических процессов, средств и методов, направленных на совершенствование надежности технических систем. Ввиду сложности проблемы надежности появляется необходимость использования системного подхода к решению и построению системы обеспечения надежности изделий [4].

Оценка надежности технологической системы производится на стадиях проектирования и изготовления (разрабатываемые технологические системы), а также на стадии эксплуатации (действующие технологические системы). Оценка надежности технологической системы проводится с целью оптимизации надежности вновь проектируемых ТС, а также поддержания необходимого уровня надежности действующих систем [1].

Надежность системы, как правило, определяется с целью:

1. понять, достижима ли заданная надежность на данном уровне развития техники;
2. дать возможность распределить значения показателей надежности по узлам, блокам и элементам;
3. помочь совершить необходимый выбор между разными конструктивными решениями;

4. выяснить, целесообразно ли введение резервирования.

Существуют два пути определения надежности технической системы: с составлением математической модели функционирования и, непосредственно, по функциональной схеме системы. Общепринятым на сегодняшний день является первый путь. На этом этапе появляется необходимость определить, какие состояния технической системы надо учитывать, признаки этих состояний и т.д., т.е. необходимо описать функционирование существующей технической системы языком событий, состояний и взаимосвязей.

Оценка надежности технической системы можно осуществлять в следующей последовательности:

1. рассмотрение принципиальной схемы системы, изучение ее функционирования и связей между отдельными элементами системы;
2. сложные системы разбиваются на подсистемы;
3. определяется формулировка отказа;
4. создается структурная схема для расчета;
5. составляется таблица расчета надежности;
6. исходя из данных в таблице, полученной на предыдущем этапе, вычисляются

количественные характеристики подсистем и системы в целом.

Особую значимость определение надежности приобретает для сложных тех-

нических систем. Рассмотрим структурную схему производственного процесса получения стального листа горячей прокаткой (рис. 2).

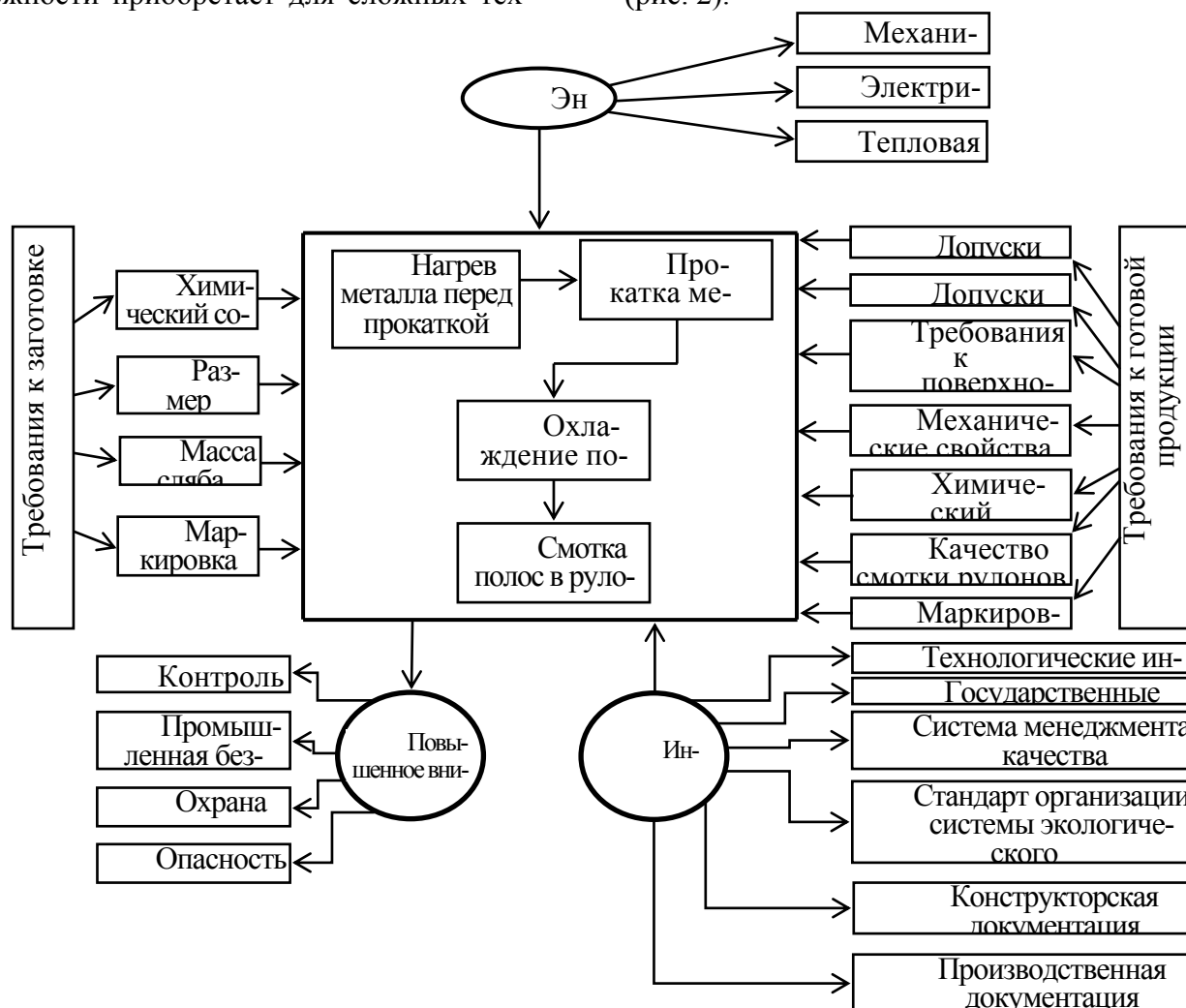


Рис. 2. Структурная схема производственного процесса получения стального листа методом горячей прокатки

Как известно, изменение свойств полупродукта в ходе технологического процесса происходит непрерывно. Объект переходит в промежуточные состояния в результате проведения операций, которые являются подпроцессами в рамках данного технического процесса. Каждая подсистема или процесс имеет свой подвод энергии, материала и информации [5]. Для того чтобы система функционировала, необходимо обеспечить их непрерывный сквозной поток и прохождение через все ее элементы.

Основными операциями технологии горячей прокатки являются «нагрев металла перед прокаткой», «прокатка металла»,

«охлаждение полосы», «смотка полос в рулоны», которые осуществляются непрерывно и связаны между собой потоками материала и информации. Поток материала на входе технологического процесса «горячая прокатка» будут являться свойства заготовки, на выходе – соответствующие требования, предъявляемые к готовой продукции. К потокам энергии данной технической системы относятся механическая, электрическая и тепловая. К потоку информации можно отнести не только режимы соответствующих операций, но и различную нормативную документацию, действующую на предприятии.

Учитывая специфику данного объекта [6-8] и сложность всей системы в целом, для того, чтобы оценить ее надежность необходимо большой массив данных и расчетов [9-16].

При комплексной оценке надежности технологической системы согласно ГОСТ 27.203-83 критерии, определяющие работоспособность, необходимо подразделять на группы, характеризующие [1]:

- качество изготовления (Q), считая параметры технологического процесса, регламентированные технологической документацией, и (или) показатели качества произведенной продукции;

- производительность (R), считая количество изготовленной продукции, продолжительность производства одного изделия (партии), длительность одного цикла и т.д.;

- величины затрачиваемых (C) ресурсов (t), считая число исполнителей, количество инструмента и материалов, стоимость технического обслуживания и т.п.

Состояние технологической системы $S(t)$ можно считать работоспособным, если одновременно выполняются условия:

$$S(t) \in \tilde{S} \Rightarrow \{ (t) \in \tilde{Q}; R(t) \in \tilde{R}; C(t) \in \tilde{C} \}, \quad (1)$$

где $\tilde{S}$ - множество допустимых состояний технической системы;

$Q(t)$, $R(t)$, $C(t)$ - значения параметров качества, производительности и величин затрачиваемых ресурсов в момент t ;

$\tilde{Q}$, $\tilde{R}$, $\tilde{C}$ - множества допустимых значений параметров качества, производительности и затрачиваемых ресурсов, при которых техническая система считается работоспособной.

Условием безотказности технологической системы по ГОСТ 27.203-83 по j -му параметру за наработку T является выполнение неравенства:

$$E_{ij} \leq y_j(t) \leq E_{sj}, \quad (2)$$

для всех $t \in (0, T)$

где E_{ij} и E_{sj} - соответственно нижнее и верхнее предельные отклонения для j -го параметра, установленные НТД; $y_j(t)$ - значения j -го параметра в момент t .

При этом наработка T может измеряться в единицах времени, циклах функционирования или в единицах изготовленной продукции.

Вероятность выполнения задания технологической системы по j -му параметру должна определяться на основе выражения:

$$P\{E_{ij} \leq y_j(t) \leq E_{sj}\} \leq P_j(t). \quad (3)$$

Согласно ГОСТ 27.002 – 2009 вероятность безотказной работы $R(t_1, t_2)$: Вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях в интервале времени (t_1, t_2) .

Предполагается, что в начале интервала времени изделие находится в работоспособном состоянии. При $t_1 = 0$ обозначают как $R(t)$.

Мгновенную интенсивность отказов $\lambda(t)$ [3] следует считать пределом, если он существует, отношением условной вероятности, что момент отказа неремонтируемого изделия произойдет в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ к длине этого интервала Δt , стремящейся к нулю, при условии, что в начале этого интервала изделие находилось в работоспособном состоянии.

Мгновенную интенсивность отказов вычисляют по формуле:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (4)$$

где $F(t)$ и $f(t)$ являются функцией распределения и плотностью распределения вероятности отказа.

Средняя интенсивность отказов $\bar{\lambda}(t_1, t_2)$ - это среднее значение мгновенной интенсивности отказов в интервале времени (t_1, t_2) .

Среднюю интенсивность отказов вычисляют по формуле:

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt. \quad (5)$$

Существующее большое количество критериев и формул для их расчетов, что делает оценку надежности очень сложной задачей. Разработка комплекса методов и методик анализа подходов к оценке технических систем большой размерности и высокой структурной сложности при помощи структурной декомпозиции системы и ее моделей надежности предоставит возможность уменьшить объемы сбора данных и информации, значительно ускорит получение данных для научно обоснованной и объективной оценки уровня надежности системы, для разработки планов ее обеспечения, обоснования, выработки и оптимизации технических решений, учитывая их экономическую целесообразность на этапах исследования, проектирования и промышленной эксплуатации системы.

Данный подход к рассмотрению процесса прокатки позволяет установить связи между отдельными потоками при переходе от одной операции к другой и является основой для создания математической модели, которая необходима для оценки надежности конкретной системы.

Список литературы

1. ГОСТ 27.203-83 (СТ СЭВ 3945-82) Надежность в технике (ССНТ). Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности.
2. ГОСТ 27.002 – 2015. Надежность в технике. Термины и определения.
3. ГОСТ 27.002 – 2009. Надежность в технике. Термины и определения.
4. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2016. - № 4. - С. 100-105.
5. Ширяева Е.Н. Проектирование процесса горячей прокатки на основе системного анализа: XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля: тез. докл. / Санкт-

Петербургский горный университет, 2019. - С. 284.

6. Corbett K.T., Bowen R.R., Peterson C.W. High strength pipeline economics // Proceeding of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu. Hawaii. USA. May 25-30. 2003.
7. Stalheim D.G. Production of fine grained as rolled structural plate steels / D.G. Stalheim, R. Glodowsky // Iron and Steel Technology. - 2010. - №10. - pp. 78-84.
8. Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2017. - Т. 15. - №1. - С. 45-55.
9. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
10. Стандарт МЭК 1078(1991). Методы анализа надежности. Метод расчета безотказности с использованием блок-схем.
11. МР 252-87. Надежность в технике. Расчет показателей ремонтпригодности при разработке изделия. Методические рекомендации.
12. РД 50-476-84. Методические указания. Надежность в технике. Интервальная оценка надежности технического объекта по результатам испытаний составных частей. Общие положения.
13. РД 50-518-84. Методические указания. Надежность в технике. Общие требования к содержанию и формам представления справочных данных о надежности комплектующих изделий межотраслевого применения.
14. Стандарт МЭК 300-3-1(1991). Управление надежностью. Часть 3. Руководства. Раздел 1. Обзор методов анализа надежности.
15. РД 50-54-82-88. Надежность в технике. Выбор способов и методов резервирования.
16. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.

References

1. GOST 27.203-83 (CMEA Standard 3945-82). Reliability in technique. Technological systems. General requirements for the methods of reliability estimation.
2. GOST 27.002 – 2015. Dependability in technics. Terms and definitions.
3. GOST 27.002 – 2009. Dependability in technics. Terms and definitions.
4. G.Sh. Rubin, Yu.V. Danilova, M.A. Polyakova. System analysis in standardization. Standardization as the form of systems' coordination. Modern technologies. System analysis. Simulation, 2016, No 4, pp. 100-105.
5. Shiriaeva E.N. Development of hot rolling based on system analysis. XVII All-Russian conference-

- competition for students and post graduate students of mining and geological, oil and gas, energetic, machine design and metallurgical profiles, St-Petersburg: Publishing house of St-Petersburg mining university, 2019, p. 284.
6. Corbetl K.T., Bowen R.R., Peterson C.W. High strength pipeline economics. Proceeding of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu. Hawaii, USA, May 25-30, 2003.
 7. Stalheim D.G., Glodowsky R. Production of fine grained as rolled structural plate steels. Iron and Steel Technology, 2010, Vol. 10, pp. 78–84.
 8. Rumyantsev M.I. Nekotorye rezultaty razvitiya i primeneniya metodologii uluchsheniya listoprokatnykh tekhnologicheskikh sistem [Some results of the development and application of the methodology for enhancing steel sheet production systems]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technica University], 2017, No. 15 (1), pp. 45-55.
 9. GOST 27.301-95. Dependability in technics. Dependability prediction. Basic principles.
 10. IEC Standard 1078(1991) Risk management. Reliability block diagram method.
 11. Guidelines 252-87. Dependability in technology. Calculation of maintainability indicators during product development. Guidelines.
 12. Guidance Document 50-476-84. Methodical instructions. Dependability in technics. Interval assessment of the Dependability of a technical object based on the results of tests of its component parts. General provisions.
 13. Guidance Document 50-518-84. Methodical instructions. Dependability in technics. General requirements for the content and presentation of reference data on the reliability of components for intersectoral use.
 14. IEC Standard 300-3-1(1991). Dependability management. Part 3. Application guide. Section 1. Review of Dependability analysis methods.
 15. Guidance Document 50-54-82-88. Dependability in technics. The choice of backup means and methods.
 16. GOST 27.310-95. Dependability in technics. Failure mode, effects and criticality analisys. Basic principles.

УДК 62.2629.1

ДВУСТОРОННЯЯ ЛЕТНЕ-ЗИМНЯЯ АВТОМОБИЛЬНАЯ ШИНА: ПРЕИМУЩЕСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

И.П. Войку¹, И.А. Комиссаров¹¹ ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет», г. Псков, Российская Федерация

Аннотация

Совершенствование конструкции шин рассматривается как основной сценарий инновационного развития шинной отрасли. Представлены результаты научно-исследовательской работы сотрудников ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет», разработавших полезную модель «Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина» (Патент на полезную модель №182679). Раскрываются конструктивные особенности двусторонней летне-зимней автомобильной шины, а также отличительные особенности, определяющие ее научную новизну. Обеспечение возможности круглогодичного использования пневматической шины выделено как основная техническая задача, решаемая предлагаемой полезной моделью. Перспективы производства двусторонней летне-зимней пневматической шины связываются с возможностью ее многократного и периодического выворачивания. В статье конкретизированы конструктивные особенности автомобильных пневматических шин, которые в том или ином состоянии являются препятствиями для выворачивания шины. Делается заключение, что конструктивные особенности предопределяют возможность и скорость выворачивания, а знание предельных значений деформации конкретизирует требования к производству инновационной разработки.

Ключевые слова: пневматическая шина, конструкции шин, модель, конструктивные особенности, выворачивание, протекторная поверхность, брекер, протектор, агдезия.

DOUBLE-SIDED SUMMER-WINTER CAR TIRE: ADVANTAGES AND PROSPECTS OF INDUSTRIAL PRODUCTION

I.P. Voiku¹, I.A. Komissarov¹¹Pskov State University, Pskov, Russian Federation

Abstract

Improving the design of tires is considered as the main scenario for the innovative development of the tire industry. The results of the research work of the employees of FSBEI HE "Pskov State University", who developed the utility model "Two-way summer-winter pneumatic tire" (Utility Model Patent No. 182679), are presented. The design features of a two-way summer-winter car tire are revealed, as well as the distinguishing features that determine its scientific novelty. Ensuring the possibility of year-round use of a pneumatic tire is highlighted as the main technical problem solved by the proposed utility model. Prospects for the production of a bilateral summer-winter pneumatic tire are associated with the possibility of its multiple and periodic eversion. The article specifies the design features of automobile pneumatic tires, which in one state or another are obstacles to turning the tire. It is concluded that design features predetermine the possibility and speed of inversion, and knowledge of the limiting values of the deformation specifies the requirements for the production of innovative development.

Keywords: pneumatic tire, tire structures, model, design features, inversion, tread surface, breaker, tread, adhesion.

Введение

После изобретения в 1888 г. резиновых пневматических шин, началось бурное развитие автомобильной и, в том числе, шинной промышленности [1/2]. Появление шин из синтетического каучука в первой половине XX века ускорило этот процесс.

Современные высокотехнологичные шины обладают целым рядом преимуществ, среди которых экологичность и экономичность [1].

Необходимость дальнейшего повышения конкурентоспособности заставляет производителей шин не только расширять мо-

дельный ряд, но и совершенствовать конструкцию шин [2].

Компания Global Industry Analysts, Inc. (GIA) еще в начале опубликовала 2013 г. прогноз для мировой шинной отрасли, отметив неослабевающее стремление производителей шин к инновациям. Несмотря на все сложности, предприятия шинной промышленности стремятся внедрять экологические инновации и разрабатывать новые продукты. Сейчас производители должны сосредоточиться на шинах, разработанных в соответствии с экологическими стандартами и позволяющих сокращать расходы [1].

Согласно временным нормам эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств рд 3112199-1085-02, утвержденных Минтрансом Российской Федерации еще в 2002 г., которые действуют в настоящее время, среднестатистический пробег легковых шин зарубежного производства и стран СНГ до износа протектора составляет 40...60 тыс. км [3].

Увеличение среднестатистического пробега автомобильных шин, в том числе за счет их всесезонной эксплуатации, может стать одним из направлений развития инноваций в шинной промышленности.

Материалы и методы исследования

Сотрудниками ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» разработана модель двусторонней летне-зимней автомобильной пневматической шины (Патент на полезную модель №182679).

Разработанная модель содержит переворачиваемую протекторную часть с рисунком на двух противоположащих подобных поверхностях, соединённых слоем адгезивного материала, одна из которых содержит шипы противоскольжения и выполнена из зимнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при отрицательной температуре, другая – выполнена из летнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при высоких положительных температурах [4]. Периодичность переворачивания пневматической шины определяется в первую очередь временем года, а не износом

наружной протекторной части до предельного значения.

Поперечный срез разработанной модели в летний (А) и зимний (В) периоды эксплуатации, представленный на рисунке 1 поясняет техническую сущность двусторонней летне-зимней шины [4].

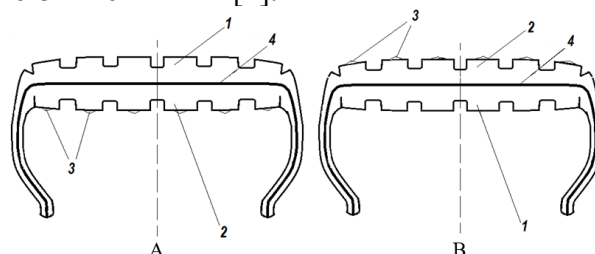


Рис. 1. Поперечный срез шины в летний (А) и зимний (В) период эксплуатации

Принципиально, конструкция шины состоит из первой протекторной поверхности 1, выполненной из летнего состава резиновой смеси, второй протекторной поверхности 2, выполненной из зимнего состава резиновой смеси и оборудованной шипами противоскольжения 3, а первая и вторая протекторные поверхности связаны между собой слоем адгезивного материала 4 [4].

Преимущества инновационной разработки

Полезная модель имеет следующие отличительные особенности, определяющие научную новизну: внутренняя часть шины представляет собой зеркальное отражение внешней, одна из частей шины оборудована шипами, при необходимости шину можно вывернуть [5].

В летний период времени предполагается эксплуатация наружной протекторной поверхности. Для эксплуатации в зимний период времени производится выворачивание разработанной шины. При этом внутренняя протекторная поверхность становится наружной, т.е. рабочей. Последующая смена сезонов года сопровождается повторным переворачиванием. Продолжительность эксплуатации каждой протекторной части может осуществляться степенью износа.

Таким образом, разработанная модель обеспечивает возможность круглогодичного использования одного комплекта автомо-

бильных шин. Такая возможность призвана сократить затраты на производство и эксплуатацию пневматических шин. Кроме того, особенности строения снижают вероятность сквозного прокола беговой дорожки протектора.

Перспективы производства двусторонней летне-зимней шины

Перспективы производства двусторонней летне-зимней пневматической шины предопределены возможностью ее многократного и периодического выворачивания. Выворачивание – сложный процесс деформации протектора, каркаса, брекера, боковин и бортовых колец пневматической шины.

Основным препятствием многократного выворачивания пневматической шины, а, соответственно, и решения технической задачи являются конструктивные особенности автомобильных пневматических шин, выпускаемых в соответствии с ГОСТ 4754-97 «Шины пневматические для легковых автомобилей, прицепов к ним, легких грузовых автомобилей и автобусов особо малой вместимости» [6].

Современные автомобильные шины представляют собой резинокордную оболочку, заполненную сжатым воздухом, которая обладает эластичностью во всех направлениях (рис. 2) [7].

К конструктивным особенностям, изученным в процессе научно-исследовательской работы, отнесены [8]:

1. Строение каркаса. Наиболее эластичными свойствами, позволяющими обеспечить значительные деформации под воздействием внешней нагрузки, являются пневматические резинокордные оболочки. Каркас состоит из нескольких слоев обрешиненного корда, образующих сеть перекрещивающихся слоев нитей [9]. В отличие от диагонального расположения нитей, радиальное – менее жесткое, затрудняющее процесс выворачивания шины. Стекловолоконные нити, отличающиеся повышенной стойкостью к гниению и растягиванию, также затрудняют процесс выворачивания пневматической шины.

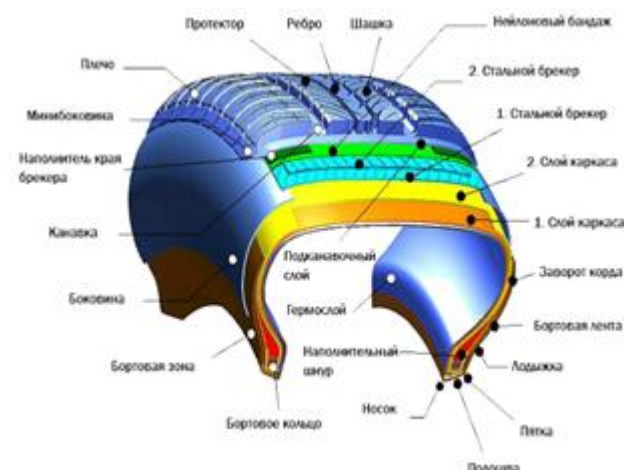


Рис. 2. Составные части автомобильной шины [7]

2. Структура брекера. Способность заполненной воздухом шины изменять свои размеры и форму прямо пропорциональна количеству обрешиненных слоев ткани или металлокорда, охватывающих каркас шины по его внешней части.

3. Состояние бортового кольца. Борта пневматической шины не должны растягиваться (рис. 3). Поэтому бортовое кольцо состоит из практически не растягивающегося проволоочного сердечника.

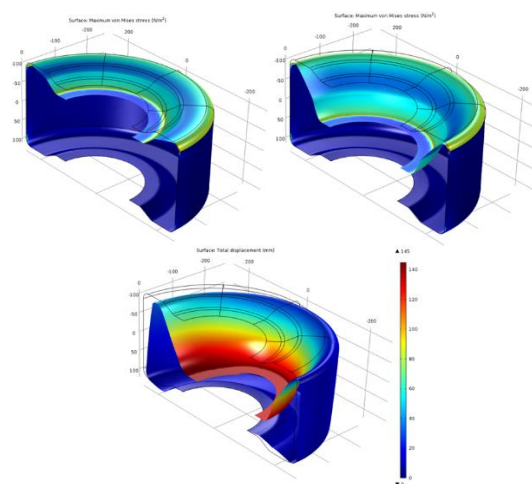


Рис. 3. Моделирование растяжения боковины пневматической шины при выворачивании

4. Бортовое кольцо, состоящее из практически не растягивающегося проволоочного сердечника, обеспечивающего плотную посадку на обод диска, предотвращает возможность соскакивания пневматической шины во время движения. Растяжение или разрыв бортового кольца, иные формы де-

формации, сопровождающие процесс выворачивания, не позволят обеспечить надежное крепление шины на диске.

5. Конфигурация профиля шины. Сложность выворачивания шины прямо пропорциональна отношению высоты к ширине профиля шины. Сверхнизкопрофильность шины обеспечивает высокую скорость выворачивания без повреждения бортового кольца.

6. Особенности строения протектора. Выполнение внешней части протектора в виде четкого симметричного ненаправленного рисунка, облегчает процесс выворачивания пневматической шины без деформации беговой дорожки. Иные варианты исполнения протектора (симметричный направленный, ассиметричные направленный и ненаправленный) затрудняют процесс выворачивания.

7. Высота рельефного рисунка и подканавочного слоя. Толщина подканавочного слоя, определяющая прочность каркаса при воздействии сосредоточенной нагрузки, как и высота рельефа рисунка, определяющая значение момента инерции колеса и его сопротивление качению, прямо пропорциональны скорости выворачивания пневматической шины.

8. Необходимость обеспечения высокой адгезионной прочности в системе «металл-корд-резина». Введение в рецептуру резиновых смесей, используемых при производстве автомобильных шин, специальных ингредиентов, так называемых промоторов адгезии, позволяет решить эту задачу. Так, например, модифицированный хлоридом кобальта (II) кремнезем позволяет не только удешевить эластомерные композиции, но и улучшить их адгезионные свойства. Условное напряжение при удлинении 300%, условная прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве и сопротивление раздиру при 23°C и после теплового старения также практически не изменяются [10].

Конструктивные особенности перечисленных базовых элементов определяют возможность и скорость выворачивания, точки приложения и направления усилий. Изучение предельных значений деформации

позволит обосновать параметры технологии выворачивания полезной модели. Знание предельных значений деформации конкретизирует требования к производству инновационной разработки «Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина».

Выводы

Необходимость дальнейшего повышения конкурентоспособности заставляет производителей шин не только расширять модельный ряд, но и совершенствовать конструкцию шин. Увеличение среднестатистического пробега автомобильных шин, в том числе за счет их всесезонной эксплуатации, может стать одним из направлений развития инноваций в шинной промышленности.

Сотрудниками ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» разработана модель двусторонней летне-зимней автомобильной пневматической шины. Разработанная модель содержит переворачиваемую протекторную часть с рисунком на двух противолежащих подобных поверхностях, соединённых слоем адгезивного материала, одна из которых содержит шипы противоскольжения и выполнена из зимнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при отрицательной температуре, другая – выполнена из летнего состава резиновой смеси, сохраняющего эластичность при высоких положительных температурах.

В летний период времени предполагается эксплуатация наружной протекторной поверхности. Для эксплуатации в зимний период времени производится выворачивание разработанной шины. При этом внутренняя протекторная поверхность становится наружной, т.е. рабочей. Разработанная модель обеспечивает возможность круглогодичного использования одного комплекта автомобильных шин.

Перспективы производства двусторонней летне-зимней пневматической шины predeterminedены возможностью ее многократного и периодического выворачивания. Основным препятствием выворачивания являются конструктивные особенности автомобильных пневматических шин:

1. Строение каркаса;
2. Структура брекера;
3. Состояние бортового кольца;
4. Конфигурация профиля шины;
5. Особенности строения протектора;
6. Высота рельефного рисунка и подканавочного слоя;
7. Необходимость обеспечения высокой адгезионной прочности в системе «металлокорд-резина».

Конструктивные особенности предопределяют возможность и скорость выворачивания, точки приложения и направления усилий. Изучение предельных значений деформации позволит обосновать параметры технологии выворачивания полезной модели. Знание предельных значений деформации конкретизирует требования к производству инновационной разработки «Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина».

Список литературы

1. Чалдаева Д.А., and Хусаинов А.Д. "Применение натурального и синтетического каучука в шинной промышленности" Вестник Казанского технологического университета, vol. 16, no. 11, 2013, pp. 195-198.
2. Чемеринский В.Б. "Процедура совершенствования шин и их производства" Транспортное дело России, no. 6-2, 2012, pp. 253-256.
3. Рябов Игорь Михайлович, Чернышов Константин Владимирович, Поздеев Алексей Владимирович, Мухучев Шамиль Магомедович, and Мухидинов Юсуп Мухтарович. "Необходимость научно-обоснованного выбора серии профиля шин при их замене для обеспечения безопасности " Вестник Иркутского государственного технического университета, vol. 22, no. 10 (141), 2018, pp. 227-238.
4. Войку И.П., Комиссаров И.А., Шманай И.А. Двусторонняя летне-зимняя пневматическая шина // Патент на полезную модель RUS №182679 28.08.2018.
5. Tarasov V.N. Method of sections in analytical calculations of pneumatic tires / V.N. Tarasov, I.V. Boyarkina // Journal of Physics: Conference Series - 2018. - T. 944, p. 012116.
6. ГОСТ 4754-97. Шины пневматические для легковых автомобилей, прицепов к ним, легких грузовых автомобилей и автобусов особо малой вместимости. Технические условия. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017825> (дата обращения: 29.04.2019).
7. Иевлева В.В., and Хамматова В.В. "Анализ технического текстиля, применяемого для автомо-

- бильных шин" Вестник Казанского технологического университета, vol. 20, no. 16, 2017, pp. 64-68.
8. ГОСТ 22374-77 Шины пневматические. Конструкция. Термины и определения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-22374-77> (дата обращения: 29.04.2019).
9. Щепетков Владимир Александрович, Аникин Евгений Сергеевич, Зубарев Александр Викторович, Звонов Александр Олегович. "Углы наклона нити к меридиану на сборочном барабане и экваторе поверхности резинокордной оболочки" Омский научный вестник, no. 4 (154), 2017, pp. 17-20.
10. Касперович А.В., Кротова О.А., Потапов Е.Э., Резниченко С.В., and Шкодич В.Ф. "Влияние модифицированного кремнезема на адгезию резины к металлокорду" Вестник Казанского технологического университета, vol. 17, no. 14, 2014, pp. 235-237.

References

1. D.A. Chaldaeva, A.D. Husainov, Application of natural and synthetic rubber in the tire industry, Bulletin of Kazan Technological University, v. 16(11), pp. 195-198 (2013)
2. V.B. Chemerinskij, The procedure of improvement of tires and their production Transport business of Russia, v. 6-2, pp. 253-256 (2012)
3. I.M. Ryabov, A.V. Pozdееv, S.H.M. Muhuchev, Y.U.M. Muhidinov, The need for science-based choice of a series of tire profiles when replacing them to ensure safety, Bulletin of Irkutsk State Technical University, v. 22, no. 10(141), pp. 227-238 (2018)
4. I.P. Voiku, I.A. Komissarov, I.A. Shmanaj, Double-sided summer-winter pneumatic tire, Russian patent RUS182679 (2018)
5. V.N. Tarasov, Method of sections in analytical calculations of pneumatic tires, Journal of Physics: Conference Series, v. 944(1) (2018)
6. Pneumatic tires for light vehicles, trailers to them, light trucks and buses of extra small capacity. Technical regulations, GOST 4754-97. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017825> (date of access: 29.12.2018).
7. V.V. Ievleva, V.V. Hammatova, Analysis of technical textiles used for automobile tires, Bulletin of Kazan Technological University, v. 20(16), pp. 64-68 (2017)
8. Pneumatic tires. Design. Terms and definitions, GOST 22374-77. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-22374-77> (date of access: 29.04.2019)
9. V.A. Shchepetkov, E.S. Anikin, A.V. Zubarev, A.O. Zvonov, The angles of inclination of the thread to the meridian on the assembly drum and on the centerline of the surface of the rubber-cord casing, Omsk Scientific Bulletin, v. 4(154), pp. 17-20 (2017)
10. A.V. Kasperovich, O.A. Krotova, E.E. Potapov, S.V. Reznichenko, V.F. Shkodich, Effect of modified silica on adhesion of rubber to metal cord, Bulletin of Kazan Technological University, v. 17(14), pp. 235-237 (2014).

УДК 621.914.01

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИЙ

Е.А. Левченко¹, С.М. Братан¹, А.Г. Колесов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Разработана модель, основывающаяся на теории деформации металла при многократных ударах рабочих тел, с учетом потенциальной энергии слоя металла, и, дающая возможность производить оценку изменения состояния поверхностного слоя в режиме обработки. Предложенная математическая модель, позволяет определять удельную работу, совершаемую рабочей средой над поверхностным слоем в процессе обработки.

Ключевые слова: математическая модель, удельная работа, амплитуда, поверхностный слой.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF PROCESSING PARTS USING VIBRATIONS

E.A. Levchenko¹, S.M. Bratan¹, Kolesov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

A model is developed that is based on the theory of metal deformation during repeated impacts of working fluids, taking into account the potential energy of the metal layer, and which makes it possible to assess changes in the state of the surface layer in the processing mode. The proposed mathematical model allows us to determine the specific work performed by the working medium over the surface layer during processing.

Keywords: mathematical model, specific work, amplitude, surface layer.

Введение

Математическое моделирование процесса вибрационной обработки является достаточно сложной задачей. В первую очередь это связано с тем, что рабочая среда, как уже указывалось, является сыпучей средой, характеристики которой значительно изменяются в зависимости не только от свойств ее элементов, но и от режимов работы и параметров конструкции вибрационного станка. Изменяются такие свойства, как способность среды передавать силовой импульс в зону обработки, транспортирование рабочей среды, появление в контейнере зон с различной интенсивностью обработки.

В работах [1-4] приведена классификация математических моделей в зависимости от различных теоретических подходов и применяемых гипотез. Так в отдельные группы были выделены:

- модели, основанные на представлении рабочей среды как упругой вязкопластичной жидкости;
- вероятностно-кинематические модели;
- модели, в которых рассматриваются непосредственный контакт зерна гранулы и фрагмента поверхности детали;
- реологические модели, в которых рабочая среда представлена как система элементов упругости и демпфирования, где в качестве критерия производительности процесса, предлагается принять энергию, поглощаемую рабочей средой [5].

Именно знание энергетических характеристик рабочей среды, отвечающих заданной степени пластической деформации, заданной степени и глубине наклепа, полному смятию микронеровностей исходной поверхности и прочее, является базой научно-обоснованного назначения режимов вибрационной отделочно-упрочняющей обработ-

ки на различных операциях. Необходимость учета исходной шероховатости связана с соизмеримостью глубины внедрения частиц рабочей среды и высоты микронеровностей. От получаемого микрорельефа поверхности зависит так же эффективность использования процесса для упрочнения и нанесения покрытий.

Результаты и обсуждение

Поэтому ставится задача нахождения взаимосвязей между энергией частиц рабочей среды, температурой обработки и их влияния на формирование микрорельефа и показателей качества поверхностного слоя.

Для получения расчетных зависимостей введем следующие обозначения и допущения:

- шероховатость рабочей среды меньше шероховатости обрабатываемой поверхности;
- рабочая среда – рассматривается диаметр шара D ;
- твердость рабочей среды больше твердости обрабатываемой поверхности;
- глубина рабочей среды в поверхность λ много меньше радиуса кривизны в точке контакта;
- внедрение гранулы рабочей среды по нормали к поверхности.

Энергию, затрачиваемую на пластическую деформацию поверхности (образование пластического отпечатка) $\mathcal{E}_d$ и энергию, восстанавливаемую при отскоке $\mathcal{E}_o$, определяют из следующих выражений [2]:

$$\mathcal{E}_o = \int_0^l P_1 dl = \int_0^r \frac{3P}{2r^6} \cdot f(E) \cdot r_1^4 dr_1 = \frac{3P^2}{10r} f(E) \quad (1)$$

где P_1, r_1 и P, r – текущие и начальные значения силы и радиуса площадки контакта при упругом восстановлении отпечатка, H, m ; l – упругая составляющая глубины отпечатка, m .

$$P_1 = \frac{Pr_1^3}{r^3}, \quad l = \frac{3P_1}{4r_1} f(E),$$

$$f(E) = \frac{1-\mu^2}{E} \quad (2)$$

E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, Pa .

$$\mathcal{E}_d = \int_0^h F dh = \int_0^d A_1 D^{2-n} \frac{d^{n+1}}{2D_1} dd = A_1 D^{2-n} \frac{d^{n+2}}{2D_1(n+2)} \quad (3)$$

где D – диаметр кривизны поверхности восстановленного отпечатка, m ;

$$F = A_1 D^2 \left(\frac{d}{D} \right)^n \text{ – уравнение Майера;}$$

A_1 и n – коэффициенты в уравнении Майера; h – глубина восстановленного отпечатка, $h = \frac{d^2}{4D_1}$.

Так как среднее давление в конце процесса деформации $P_2 = \frac{4A_1}{\pi D^{n-2}} d^{n-2}$, а объем

восстановленного отпечатка $V'_{omn} \approx \frac{\pi r^4}{4R_1}$, то

можно записать:

$$\mathcal{E}_d = \frac{4}{n+2} P_2 \cdot V'_{omn} = \frac{4}{n+2} P_2 \cdot \frac{\pi r^4}{4R_1} \quad (4)$$

Учитывая, что по Герцу: $\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} - \frac{3P}{4r^3} f(E)$, получается зависимость:

$$\mathcal{E}_d = \frac{4}{n+2} P_2 \frac{\pi r^4}{4R} - \frac{4}{n+2} P_2 \frac{\pi r^4}{4} \cdot \frac{3P}{4r^3} f(E) = \frac{4}{n+2} P_2 V_{omn} - \frac{5}{2(n+2)} \mathcal{E}_o$$

где $V_{omn} \approx \frac{\pi r^4}{4R}$ – кажущийся объем отпечатка.

Для общего случая обработки [2]: $\mathcal{E}_o = \mathcal{E}_d(1-K_1)K_y^2$, величина среднего давления в конце процесса удара определяется:

$$P_2 = \frac{n+2}{4} \cdot \frac{\mathcal{E}_d \left[1 - \frac{2n-1}{2(n+2)} K_y^2 \right] \cdot (1-K_1)}{V_{oom}} \quad (5)$$

С другой стороны, давление, при котором начинается пластическая деформация в центре отпечатка P_s по теории пластичности Генки-Мизеса [7], определяется формулой:

$$P_s = \frac{4}{3} \left(\frac{\sigma_s}{1-2\mu} \right) \approx 3,3\sigma_s \quad (6)$$

где σ_s – предел текучести материала поверхности при растяжении с учетом ударно-

го нагружения и температуры обработки,

$$\sigma_s = \sigma_{st} \cdot K_{дин}$$

σ_{st} – предел текучести при температуре обработки $t^\circ K$, Па;

$K_{дин}$ – коэффициент динамичности нагружения.

Требуемая для начала пластической деформации энергия частиц рабочей среды:

$$\mathcal{E}d_s = \frac{1}{1-K_1} A s = \frac{20,2 f(E)^4 D^3}{1-K_1} \cdot \left(\frac{\sigma_s}{1-2\mu} \right)^5. (7)$$

Основой для расчета параметров упрочнения и требуемых для этого энергетических характеристик рабочей среды является следующая формула:

$$d = \sqrt[5]{14,8 \mathcal{E}d \cdot D^2 f(E) \cdot (1-K_1)}. (8)$$

Учитывая работы [8, 9], получаем:

$$\mathcal{E}d_E = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_s D^3}{\left(1 - \frac{3}{8} K_y^2\right) \cdot (1-K_1)} \cdot \left(\frac{E}{K_{MH}} \right)^4, (9)$$

$$\mathcal{E}d_{hH} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_s}{\left(1 - \frac{3}{8} K_y^2\right) \cdot (1-K_1) D} \cdot \left(\frac{hH}{(1,25...1,5) K_{MH}} \right)^4, (10)$$

где E – требуемая степень деформации;

hH – глубина наклепа,

$$hH \approx (1,25...1,5) d,$$

K_{MH} – коэффициент, учитывающий накопление деформации при многократном соударении $K_{MH} = 1,54 - \frac{HB}{1000}$.

Если глубина внедрения частиц рабочей среды меньше $\lambda \leq R \max_0$, то величина исходной шероховатости по данным [10] оказывает существенное влияние на формирование поверхностного слоя.

Под воздействием рабочей среды микровыступы упруго-пластически деформируются, а деформации нижележащих слоев происходят вследствие упругого погружения оснований микронеровностей и упругих перемещений этих слоев под действием нагрузки на фактическую площадь контакта [8].

Так как микровыступы и микровпадины покрыты наслоениями из окислов, адсорбированных газовых, водных, жировых молекул, то деформирование таких микронеровностей затруднено. Расклинивающий эффект во впадинах увеличивает необходимые деформирующие давления до $8\sigma_s$ материала микронеровностей, приводит к несоответствию расчетных и экспериментальных фактических площадей контакта и сближения шероховатых поверхностей при больших нагрузках [7], что и происходит при введении еще одной фазы – цинкового порошка. Поэтому воспользоваться приведенными автором [2] зависимостями сложно.

К числу наиболее важных параметров процесса, контролируемых во время обработки, относится амплитуда и частота колебаний технологического оборудования, скорость частиц и массу наполнителя, объем загрузки, состав и концентрацию среды.

Амплитуду колебаний – A , при траектории колебаний, близкой к круговой, определяем по следующей зависимости:

$$A = \frac{100 m_0 z_0 \omega^2}{z \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2 Mb}{z} + \frac{4 h_0^2 \omega^2 Mb}{z}\right)}}, (11)$$

где m_0 – масса дебалансов вибровозбудителя, кг;

z_0 – расстояние от центра масс дебалансов до оси их вращения, м;

ω – круговая частота вращения дебалансов, 1/сек;

z – суммарная жесткость связей станка в вертикальном направлении, Н/м;

Mb – масса подвижных частей вибростанка, кг.

Предложенная зависимость позволяет перейти к технологическим параметрам процесса.

Список литературы

1. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
2. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
3. Левченко Е.А. Использование механохимического метода обработки сталей на вибрационных станках / Е.А. Левченко, Ю.В. Дейкун // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Вып. № 4. – С. 44 – 48.
4. Анпилогов В.А. Исследование влияния динамики массы загрузки и других факторов на интенсивность отделочных процессов объемной вибрационной обработки: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / В.А. Анпилогов. – Пермь, 2008. – 131 с.
5. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. – М.: Энергия, 1998. – 165 с.
6. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей / А.П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1996. – 134 с.
7. Бабичев А.П. Вибрационные станки для обработки деталей / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский, В.П. Устинов. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
8. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
9. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
10. Дьяченко В.И. Исследование процесса вибрационной обработки / В.И. Дьяченко // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин: сб. науч. тр. ЦНИИТМ. – Ростов-на-Дону, 1968. – С. 42-48.

References

1. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
2. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
3. Levchenko E.A. Ispol'zovanie mekhanohimicheskogo metoda obrabotki stalej na vibracionnyh stankah / E.A. Levchenko, Yu.V. Dejgun // Vestnik sovremennyh tekhnologij: sb. nauch. tr. Sevasto-pol'skij gosudarstvennyj universitet. – Seva-stopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2018. – Vyp. № 4. – С. 44 – 48.
4. Anpilogov V.A. Issledovanie vliyaniya dinamiki massy zagruzki i drugih faktorov na intensiv-nost' otdelochnykh processov ob'emnoj vibra-cionnoj obrabotki: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / V.A. Anpilogov. – Perm', 2008. – 131 s.
5. Afanas'ev Yu.V. Ferrozondy. – M.: Energiya, 1998. – 165 s.
6. Babichev A.P. Vibracionnaya obrabotka detalej / A.P. Babichev. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 134 s.
7. Babichev A.P. Vibracionnye stanki dlya obra-botki detalej / A.P. Babichev, V.B. Trunin, Yu.M. Samodumskij, V.P. Ustinov. – M.: Mashinostro-enie, 1984. – 168 s.
8. Blekhman I.I. Vibracionnoe peremeshchenie / I.I. Blekhman, G.Yu. Dzhanelidze. – M.: Nauka, 1964. – 488 s.
9. Vinogradov V.N. Abrazivnoe iznashivanie / Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 224 s.
10. D'yachenko V.I. Issledovanie processa vibraci-onnoj obrabotki / V.I. D'yachenko // Progressiv-nye metody otdelochnoj obrabotki detalej ma-shin: sb. nauch. tr. CNIITM. – Rostov-na-Donu, 1968. – S. 42-48.

УДК 669.017.3:536.421.4

О МИКРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ 50% ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ В ДИФфуЗИОННО-РЕЛАКСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Ю. А. Байков¹, Н. И. Петров¹, М. И. Тимошина², Е. В. Акимов²¹Российский химико-технологический университет имени Д.И.Менделеева, г. Москва, Российская Федерация²Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Использована схема переходной двухфазной зоны в пространстве концентраций, обусловленной действием механизма спонтанных флуктуаций концентраций частиц твердого состояния с ограниченным спектром их изменения. В диффузионно-релаксационном режиме кристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов в модели переходной двухфазной зоны (ПДЗ) оценены термодинамические параметры, при которых возможно образование полностью разупорядоченной двухкомпонентной кристаллической фазы с простой кубической элементарной решеткой и стехиометрического состава. Исследована область вблизи точки разупорядочения кристаллической фазы и установлен закон стремления параметра дальнего порядка к нулю при достижении критической температуры (переохлаждения) системы двухкомпонентный расплав-кристалл. Установлены кинетические особенности роста кристаллической фазы в точке разупорядочения. Показано, что в случае конечных переохлаждений системы двухкомпонентный металлический расплав-кристалл образуется полностью разупорядоченная кристаллическая фаза в той области температур, где согласно представлениям классической термодинамики, должна расти полностью упорядоченная в смысле параметра дальнего порядка двухкомпонентная система.

Ключевые слова: переходная двухфазная зона, двухкомпонентный металлический расплав, концентрации мономеров роста, параметр дальнего порядка в двухкомпонентных кубических элементарных ячейках, скорости кристаллизации металлических расплавов.

ON MICROCRYSTALLIZATION 50% TWO-COMPONENT METAL MELTS IN THE DIFFUSIVE-RELAXATION PROCEDURE

Yu.A.Baikov¹, N.I.Petrov¹, M.I. Timoshina², E.V.Akimov²¹D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation²Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

Abstract

Diphase zone's scheme is used in the case of limited spectrum spontaneous solid state particles concentration fluctuations. In the diffusive-relaxation procedure some binary 50% metallic melts' micro crystallization has been considered. When using so-called the diphase transitional zone there have been estimated some thermodynamic parameters at which a completely disordered binary crystalline phase characterized by simple cubic lattice and stoichiometric composition could be expected. In the vicinity of disordering point given binary crystalline phase has been studied. There has been established a physical law according to which some far order parameter tended to zero in a continuous way. A thermodynamic parameter describing the binary crystalline phase disordering has been estimated. There have been analyzed some crystalline phase kinetic peculiarities in the vicinity of disordering point. The completely disordered binary crystalline phase reconstruction law has been analyzed as the time function. The disorder-order process relaxation periods have been established in the case of simple cubic lattice binary crystalline phase investigated. It has been shown in the case of full disordering the binary crystalline phase kinetics had peculiarity namely: a mean crystallization velocity of binary crystals did some gap proportional to square degree of the far order parameter.

Keywords: diphase transitional zone, a binary metallic melts', a growth monomer concentration, a far-order parameter in binary cubic simple lattice, the metallic melts' crystallization rate.

Введение

Для создания современных металлических материалов, отвечающих требованиям

их практического применения, весьма важно изучение физической природы фазовых переходов при образовании кристаллических

систем в зависимости от выбранной модели микрокристаллизации. Не менее важное самостоятельное значение имеет развитие теории фазовых переходов и соответствующих им физических эффектов в концентрированных кристаллических фазах, формирующихся из различных исходных маточных сред. Значительное место в науке о фазовых переходах в твердых телах и в связанных с ними термодинамических системах, из которых они образуются, занимают процессы кристаллизации. При кристаллизации одно- и многокомпонентных металлических расплавов существенную роль должна играть морфология поверхности раздела двух соприкасающихся фаз системы расплав-кристалл.

В настоящее время весьма актуальным является вопрос о дальнейшем более детальном изучении морфологии растущей поверхности раздела фаз металлический расплав-кристалл.

Цель настоящего исследования состояла в изучении процессов разупорядочения двухкомпонентных металлических кристаллов стехиометрического состава с простой кубической элементарной решеткой, растущих из 50% двухкомпонентных металлических расплавов в диффузионно-релаксационном режиме кристаллизации. Также ставилась задача исследования сопутствующих данным процессам особенностей кинетики роста самих кристаллов с учетом зависимости частот присоединения мономера роста от энергий их связи в первом приближении с ближайшими мономерами роста, образующими изломы на ступени в модели ПДЗ и от температуры границы раздела системы двухкомпонентный расплав-кристалл в диффузионно-релаксационном режиме кристаллизации.

Применение флуктуационной теории нормального роста металлических одно- и двухкомпонентных кристаллов из соответствующих расплавов в области малых переохлаждений системы расплав-кристалл, изложенной в работах [1-3], позволило параллельно исследовать процессы разупорядочения вышеуказанных кристаллов в области температур, где, согласно представлениям классической термодинамики, должна расти

полностью упорядоченная кристаллическая матрица.

Эволюция переходной двухфазной зоны в диффузионно-релаксационном режиме кристаллизации

Наиболее полно проблема коллективного взаимодействия частиц расплава и кристалла (в модели переходной двухфазной зоны мономеров роста, принадлежащих разным агрегатным состояниям и разным сортам двухкомпонентной системы) может быть описана с учетом зависимости частоты присоединения этих частиц (мономеров роста) в изломах шероховатой поверхности раздела двухкомпонентных фаз – расплава и кристалла от структуры поверхности и температуры. Учет зависимости частоты обмена мономерами роста между расплавом и кристаллом в обоих направлениях от структуры и состава виртуальной переходной двухфазной области, а также от температуры кристаллизации сказывается на положении точки разупорядочения кристаллической двухкомпонентной системы.

В работах [4-7] были представлены различные варианты кинетических дифференциально-разностных уравнений, описывающих стационарную структуру виртуальной ПДЗ системы 50% двухкомпонентный металлический расплав-кристалл с учетом зависимости обеих частот обмена мономерами роста между соприкасающимися фазами расплава и кристалла от структуры двухкомпонентной ПДЗ и температуры кристаллизующейся системы в кинетическом режиме кристаллизации, в котором отсутствовали диффузионные процессы. Также на основе выбранного кинетического дифференциально-разностного уравнения была получена замкнутая система трансцендентных математических уравнений, описывающая эволюцию двухкомпонентной ПДЗ с учетом зависимости частоты присоединения мономеров роста к кристаллической фазе от структуры ПДЗ и температуры кристаллизации 50% двухкомпонентного металлического расплава в кинетическом режиме кристаллизации. Кроме того, была впервые применена

математическая теория результатов для определения температуры разупорядочения двухкомпонентной кристаллической фазы и показано, что температура разупорядочения значительно меньше температуры кинетического равновесия системы расплав-кристалл.

Экспериментальные факты получения полностью или частично разупорядоченных двухкомпонентных металлических кристаллических фаз были представлены на примере сплавов Au – Ag при их росте из соответствующих расплавов в работах [8-9]. Получение разупорядоченных двухкомпонентных кристаллов наблюдалось в области температур, меньших температуры Кюри T_c , когда по представлениям классической термодинамики должна существовать полностью упорядоченная двухкомпонентная кристаллическая система.

Положение коренным образом меняется при изменении режима кристаллизации, то есть переход типа порядок-беспорядок возможен в новом диффузионно-релаксационном режиме кристаллизации. Этот процесс описания восстановления упорядоченной кристаллической двухкомпонентной фазы в модели переходной двухфазной зоны (ПДЗ) является весьма актуальным. В работах [10-11] исследовалась возможность восстановления полностью упорядоченной двухкомпонентной кристаллической фазы с простой кубической элементарной ячейкой и стехиометрического состава при переходе от кинетического к диффузионно-релаксационному режиму кристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов.

В работе [10] представлена новая модель микрокристаллизации в модели переходной двухфазной зоны в пространстве концентраций мономеров роста твердой двухкомпонентной фазы с простой кубической ячейкой и стехиометрического состава в диффузионно-релаксационном режиме. Представленная модель близка по своей природе к процессам гетероэпидотаксии металлов и полупроводников, когда на изначальной металлической подложке накладываются слои друг на друга разных компонент [12]. Кроме того, в работе [10] определена в общем виде кинетика эво-

люции ПДЗ во времени через основные функциональные характеристики структуры переходной конечной протяженности области, отделяющей две массивные соприкасающиеся фазы – расплав и кристалл. Новая модель микрокристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов позволила изучить процессы перехода от возникающей при определенных условиях термодинамики неупорядоченной кристаллической фазы к полностью упорядоченной фазе, а также выявить времена релаксации, способствующие этому процессу.

В работе [11] с помощью новой модели микрокристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов, полученной в работе [10], исследована окрестность точки разупорядочения, оценено время релаксации, при котором происходит процесс полного упорядочения двухкомпонентной кристаллической фазы и установлен закон, по которому параметр дальнего порядка стремится к своему максимальному значению ($\eta = 1$) при временах, больших этого времени релаксации. Для оценки времени релаксации применялась математическая теория результатов. Время релаксации τ_{pi} должно быть одинаково как для разупорядоченной двухкомпонентной кристаллической фазы, так и для полностью упорядоченной фазы (при ($\eta = 1$)). Упорядочение должно начинаться от точки полного разупорядочения кристаллической двухкомпонентной системы.

Поскольку процесс упорядочения двухкомпонентной кристаллической фазы выполняется вблизи точки разупорядочения, то параметр упорядочения со временем изменяется по закону:

$$\eta(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{pi}}\right)}.$$

График зависимости параметра дальнего порядка от времени показан на рис. 1.

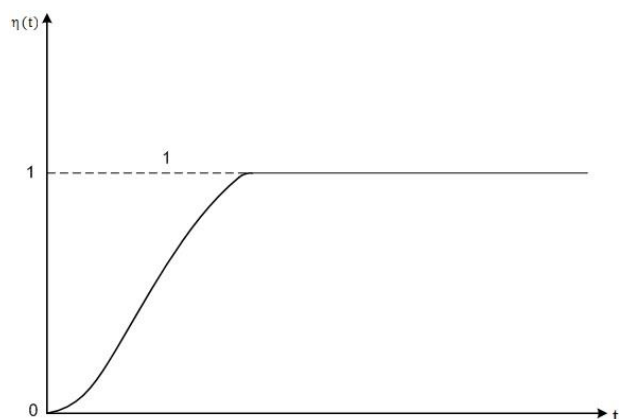


Рис. 1. Зависимость параметра дальнего порядка от времени $\eta(t)$ в диффузионно-релаксационном режиме кристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов

Выводы

В процессе кристаллизации двухкомпонентных 50% металлических расплавов в диффузионно-релаксационном режиме в модели ПДЗ наблюдается ряд особенностей в термодинамике и кинетике, которые меняются во времени. В зависимости от времени релаксации, которое оценивалось усреднением по всем монослоям ПДЗ с учетом коэффициента диффузии параметров, характеризующих пространственную неоднородность упорядоченности двухкомпонентной кристаллической фазы с простой кубической ячейкой и стехиометрического состава, изменяется величина переохлаждения двухкомпонентного расплава (температуры ПДЗ), при котором достигается полное разупорядочение двухкомпонентного кристалла. Сам процесс разупорядочения при любом возможном времени релаксации в окрестности температуры разупорядочения T_k происходит в соответствии с термодинамическим переходом Брэгга-Вильямса аналогично кристаллизации ПДЗ в кинетическом режиме.

С ростом времени релаксации требуется большее переохлаждение (меньше температура ПДЗ) для реализации полного разупорядочения двухкомпонентной кристаллической фазы с простой кубической элементарной ячейкой. Кинетика кристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов в диффузионно-релаксационном режиме

подобна кинетике бездиффузионного (кинетического) режима в окрестности температуры разупорядочения. В окрестности роста упорядоченной кристаллической фазы кинетика роста двухкомпонентного кристалла изменяется со временем (исчезает скачок в скорости роста) и обращается в нуль при временах, значительно больших времени релаксации τ_p , то есть ПДЗ исчезает со всеми своими структурными и кинетическими характеристиками.

Список литературы

1. Baikov Yu.A., Zelenev Yu.V., Haubenreisser W., H. Pfeiffer H. On the analytical theory of kinetic order-disorder phase transition in binary crystals. Influence of topological restrictions. //Phys. stat. Solidi (a), 1980, – Bd. 61. – № 2. – С. 435-446.
2. Саркисов П.Д., Байков Ю.А., Мешалкин В.П. Процессы разупорядочения в кристаллах при кристаллизации двойных металлических расплавов //ДАН РФ, т. 390, – № 6, – 2003, – С. 763-768.
3. Саркисов П.Д., Байков Ю.А., Мешалкин В.П. Математическое моделирование кристаллизации одно- и двухкомпонентных металлических расплавов. – Москва: Физматлит, 2003. – 378 с.
4. Байков Ю.А., Петров Н.И. Структура переходной двухфазной зоны при кристаллизации двухкомпонентных металлических расплавов. //Известия высших учебных заведений. Физика, № 4, – 2014, – С. 35-43.
5. Байков Ю.А., Петров Н.И. Особенности разупорядочения при кристаллизации двухкомпонентных металлических расплавов в модели переходной двухфазной зоны. //Известия высших учебных заведений. Физика, № 5, – 2014, – С. 32-44.
6. Байков Ю.А., Петров Н.И. Изучение явления разупорядочения двухкомпонентных кристаллов, растущих из металлических 50% двухкомпонентных расплавов в области температур ниже точки Кюри. // Вестник МГОУ. Сер. «Физика - Математика», № 2, – 2014, № 2, – С. 63-65.
7. Петров Н.И. Исследование процессов разупорядочения кристаллов при их росте из двухкомпонентных металлических расплавов: дис...канд. физ-мат наук. Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС". – Москва, – 2017. – 180 с.
8. Guinier A. J. Imperfections of crystal lattices as investigated by the study of X-ray diffuse scattering //Proceedings of the Physical Society, T. 57, – № 4. – 1945, – С. 310.
9. Guinier A. J., Griffoul R. //Compt. Rend. Acad. Sci. Paris. T. 260 – 1945, – С. 121.
10. Байков Ю.А., Петров Н.И., Тимошина М.И., Акимов Е.В. Модель микрокристаллизации 50%

двухкомпонентных металлических расплавов в диффузионно-релаксационном режиме //Конденсированные среды и межфазные границы, т. 21, – № 1, – 2019, – С. 4-15.

11. Байков Ю.А., Петров Н.И., Тимошина М.И., Акимов Е.В. Особенности микрокристаллизации 50% двухкомпонентных металлических расплавов в модели переходной двухфазной зоны в диффузионно-релаксационном режиме //Конденсированные среды и межфазные границы, т. 21, – № 2, – 2019, – С. 4-21.
12. Schneider H. G., //Collection: Advances in Epitaxy and Endotaxy. Akademiai Kiado, Budapest, – 1976, – С. 23-78.

References

1. Baikov Yu.A., Zelenev Yu.V., Haubenreisser W., H. Pfeiffer H. On the analytical theory of kinetic order-disorder phase transition in binary crystals. Influence of topological restrictions. //Phys. stat. Solidi (a), 1980, – Bd. 61. – № 2. – pp. 435-446.
2. Sarkisov P. D., Baikov Yu. A., Meshalkin V. P. The processes of disordering in crystals during solidification of metal melts double. //DAN R.F. v.390 – № 6, – 2003, – p. 763.
3. Sarkisov P. D., Baikov Yu. A., Meshalkin V. P. Mathematical modeling of crystallization of one - and two-component metal melts. Moscow, Physmatlit, 2003. – 378 p.
4. Baikov Yu. A., Petrov N. I. Structure of the transitive two-phase zone in crystallization of two-component metal melts //Russian Physics Journal, Vol.57, – № 4, August, – 2014, – pp. 459-468.
5. Baikov Yu. A., Petrov N. I. Special features of disordering in crystallization of two-component metal melts in the model of two-phase transitive zone.//Russian Physics Journal, Vol.57, – № 5, September, – 2014, – pp. 598-614.
6. Baikov Yu. A., Petrov N. I. To study the phenomenon of disordering of two-component crystals growing from 50% metal two-component melts at temperatures below the Curie point.// Vestnik of MGOU, ser. "Physics and Mathematics"», № 2, – 2014, № 2, – p. 63.
7. Petrov N. I. The crystal disordering study when growing from the binary metallic melts. National University of Science and Technology «MISiS» Dissertation candidate Phys. - Mat. Sciences. Moscow, – 2017 – 180 p.
8. Guinier A. J. Imperfections of crystal lattices as investigated by the study of X-ray diffuse scattering //Proceedings of the Physical Society, V. 57, – № 4. – 1945, – p. 310.
9. Guinier A. J., Griffoul R. //Compt. Rend. Acad. Sci. Paris. V. 260 – 1945, - p. 121
10. Baikov Yu. A., Petrov N. I., Timoshina M.I., Akimov E.V. The 50% binary metallic melts' micro crystallization model in the diffusive-relaxation procedure. //Condensed Matter and Interphases, v. 21, – № 1, – 2019, – pp. 4-15.
11. Baikov Yu. A., Petrov N. I., Timoshina M.I., Akimov E.V. The binary 50% metallic melts' micro crystallization peculiarities in diphase transitional zone model (DTZ) within a diffusive-relaxation procedure //Condensed Matter and Interphases, v. 21, – № 2, – 2019, – pp. 4-21.
12. Schneider H. G., //Collection: Advances in Epitaxy and Endotaxy. Akademiai Kiado, Budapest, – 1976, – pp. 23-78.

УДК 621.763; 621.362

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БОРКАРБИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ ГРАФЕНОМ

Н.Ю. Перетягин¹, Ю.О. Пристинский¹, П.Ю. Перетягин¹¹ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Искровым плазменным спеканием были получены плотные боркарбидные (B_4C) композиты и исследовано влияние температуры спекания на механические свойства. Удалось снизить температуру спекания композитов из B_4C , путем добавления к исходной матрице 0,5 об. % оксида графена. Исследовано влияние графена на плотность и механические свойства B_4C композитов. Спеченные B_4C композиты, упрочненные графеном, продемонстрировали повышенные механические свойства, такие как твердость (HV) – 36,8 ГПа, предел прочности на изгиб (σ_f) – 497 МПа, трещиностойкость (K_{IC}) – 5,9 МПа·м^{1/2}, вследствие увеличения относительной плотности, уменьшения роста зерна и возникновения блокирующих эффектов, влияющих на распространение трещины.

Ключевые слова: карбид бора, оксид графена, графен, искровое плазменное спекание, микроструктура, механические свойства.

INFLUENCE OF SPARK PLASMA SINTERING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF BORON CARBIDE COMPOSITES REINFORCED GRAPHENE

N.Y. Peretyagin¹, Y.O. Pristinsky¹, P.Y. Peretyagin¹¹Federal State Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russian Federation

Abstract

Fully dense boroncarbide (B_4C) composites were fabricated using the spark plasma sintering method and effect of sintering temperature on mechanical properties was investigated. Compared to the monolithic B_4C , the densification temperature of B_4C composites was substantially decreased by the addition of a small amount graphene. The influences of graphene on the densification behavior and the mechanical properties of B_4C composites were investigated. The sintered composites exhibited superior comprehensive mechanical properties a Vickers hardness of 36.8 GPa and flexural strength of 497 MPa, as well as fracture toughness of 5.9 MPa·m^{1/2}, owing to an enhancement in the relative density, decrease in the grain size and the blocking effects on crack propagation induced by the second phase particles.

Keywords: boron carbide, graphene oxide, graphene, spark plasma sintering, microstructure, mechanical properties.

Карбид бора (B_4C) характеризуется высокой твердостью (~ 42 ГПа), высокой температурой плавления (2450 °C), исключительной химической инертностью, низкой плотностью (2,52 г/см³) и превосходными поглощающими нейтронными свойствами (600 барн). Благодаря этим свойствам боркарбидные керамические композиты нашли широкое применение в качестве аэрокосмических материалов, средств индивидуальной защиты, нейтронного поглотителя, экрани-

рующего материала, регулирующего стержня системы управления и защиты ядерного реактора и др. [1 – 3].

Однако, уплотнение монолитной керамики на основе B_4C традиционными методами спекания (горячее прессование) требует высокой температуры спекания (~ 2200 °C) и длительного времени выдержки (~ 2 ч), вследствие высокой температуры плавления, сильной ковалентной связи, насыщенного кислородом поверхностного слоя (B_2O_3) и

низкого коэффициента самодиффузии В₄С [4, 5].

В последнее время искровое плазменное спекание (ИПС) находит все большее применение в получении композитных материалов. Особенностью процесса ИПС является очень быстрый нагрев порошкового материала, достигаемый прямым пропусканием импульсов электрического тока непосредственно через графитовую пресс-форму, что в свою очередь сокращает продолжительность рабочего цикла. Вследствие этого снижается рост зерна и образование нежелательных агломератов, что открывает возможности в области создания новых композитных материалов с уникальными свойствами [6 – 10].

Создание графена открыло новые возможности для разработки новых систем материалов с улучшенными свойствами, охватывающих широкий спектр направлений, от двигателей внутреннего сгорания до биотехнологии [11]. Было отмечено, что введение углеродных нанотрубок (УНТ), углеродных нановолокон (УНВ) и графеновых пластинок (ГП) способно улучшить механические свойства керамических композитов В₄С [12, 13].

Цель настоящей работы – исследовать влияние температуры искрового плазменного спекания, на свойства боркарбидных композитов, упрочненных графеном.

Исходными материалами для создания боркарбидных композитов, упрочненных графеном, являлись порошок В₄С со средним размером частиц $d_{50} = 2 \pm 1$ мкм (Плазмотерм, Москва, Россия) и дисперсия оксида графена (ОГ) с размером чешуек менее 3 мкм и толщиной ≤ 2 графеновых слоев (ООО «АкКо Лаб», Москва, Россия).

Дисперсия оксида графена была обработана ультразвуком в течение 1 часа для равномерного распределения частиц. Порошок карбида бора диспергировали в дистиллированной воде в течение 30 минут. Добавление оксида графена в боркарбидный порошок производилось капельным способом. Гомогенизация полученной смеси осуществлялась на шаровой мельнице (Промстроймаш, Оренбург, Россия) при 150 об/мин в течение

суток с применением мелющих тел из оксида алюминия.

Сушка суспензии производилась на лиофильной установке FreeZone2.5 (LabConco, Канзас, Миссури, США). Применение данного вида сушки обусловлено необходимостью предотвращения образования агломератов ОГ, а также исключением из технологического процесса приготовления смеси операции просеивания.

Искровое плазменное спекание порошковых боркарбидных композиций с добавлением оксида графена производилось на установке КСЕ (FCT Systeme GmbH, Раунштейн, Германия). Анализ литературных источников показал [14, 15], что плотные боркарбидные композиты без упрочняющих добавок получают при температуре спекания свыше 2000 °С. В данной работе были изготовлены при различной температуре спекания (1800 °С – 2000 °С, с шагом 50 °С) по два образца, содержащих 0 и 0,5 об. % ОГ, соответственно. Выбор данного количества упрочняющей добавки обусловлен предыдущим опытом изготовления графенсодержащих композитов [16 – 18]. ИПС образцов производилось в вакууме, давление (80 МПа) и время выдержки (10 мин) при максимальных температурах оставались неизменными для всех экспериментов.

Полученные боркарбидные композиты были исследованы на дифрактометре, сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), Рамановском спектроскопе, а также были измерены их плотность, твердость, трещиностойкость и предел прочности на изгиб. Используемое оборудование, формулы и методики расчета описаны в предыдущих работах [19 – 21].

Рентгеновская дифрактометрия исходных порошковых смесей и спеченных композитов проводилась для определения их фазового состава. Типовая дифрактограмма представлена на рисунке 1 (А). Проведенный анализ показал, что фазовый состав исходных порошковых композиций и изготовленных упрочненных графеном боркарбидных композитов остался неизменным. Возникновения во время спекания и наличия посторонних фаз, кроме В₄С, не было обна-

ружено. Спеченные образцы имеют более совершенную кристаллическую структуру, что подтверждается шириной рентгеновских линий. Проведение спектроскопии Рамана (рис. 1 (Б)) подтвердило восстановление ОГ до графена, что означает правильный выбор параметров спекания и процедуры смешивания.

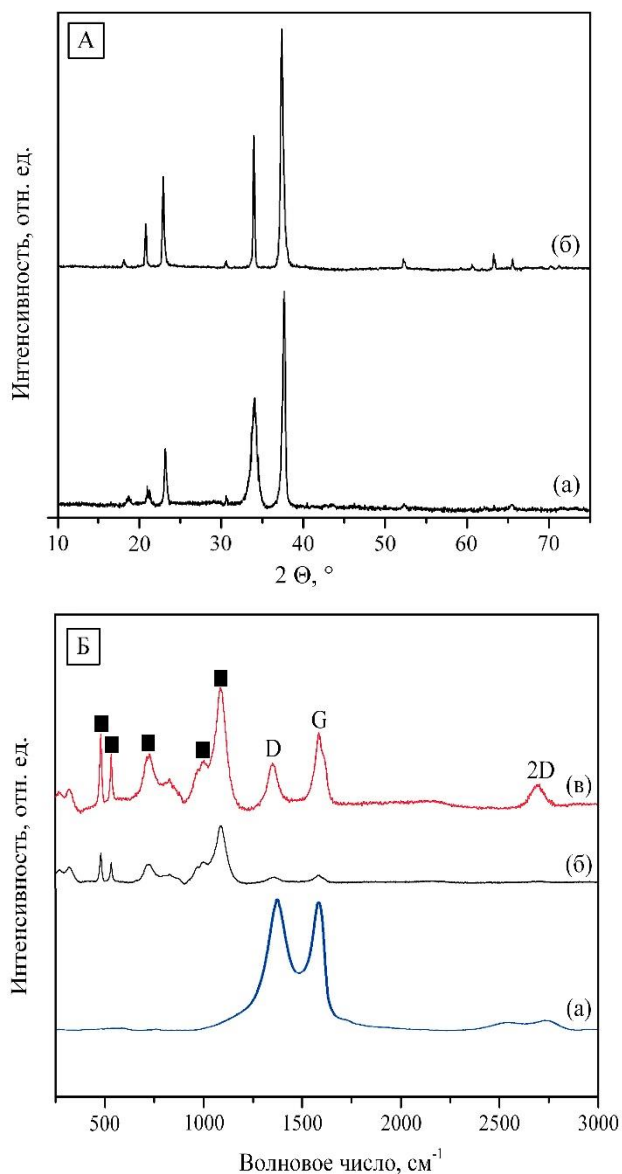


Рис. 1. (А) Типовая дифрактограмма исходного порошка V₄C (а) и спеченного композита V₄C-0,5ОГ (б). (Б) Спектроскопия Рамана суспензии ОГ (а), порошковой композиции V₄C-0,5ОГ (б) и спеченного композита V₄C-0,5ОГ (в). “■” – пики V₄C. “D”, “G”, и “2D” – пики графена

Измеренные значения физико-механических свойств (плотность, твердость, трещиностойкость и предел прочно-

сти) спеченных боркарбидных образцов представлены в Таблице 1. В следствие низкой плотности (65 – 79 % отн. теор.) у образцов, спеченных при температурах 1800 °С и 1850 °С, измерений их механических свойств не проводилось.

Таблица 1. Механические свойства спеченных боркарбидных композитов

Т _{сп} ЕК, °С	Об- ра- зец	Плот- ность, отн. теор. %	Твер- дость HV, ГПа	Трещи- стойкость, K _{1C} , МПа·м ^{1/2}	Пре- дел проч- ности, σ _б , МПа
190 0	V ₄ C	88,2	35,6	4,1	381
	V ₄ C- 0,5ОГ	89,4	36,3	4,9	389
195 0	V ₄ C	98,5	36,0	5,2	480
	V ₄ C- 0,5ОГ	98,7	36,8	5,9	497
200 0	V ₄ C	99,3	36,5	5,0	470
	V ₄ C- 0,5ОГ	99,1	36,9	5,8	485

По представленным данным в таблице 1 можно сделать вывод о том, что наилучшими по механическим свойствам являются композиты, спеченные при 1950 °С и 2000 °С. Однако при температуре 2000 °С предел прочности образцов снижается, что связано с увеличением роста зерен. Добавление ОГ положительно влияет на трещиностойкость, за счет того, что графеновые чешуйки, располагаясь на границах зерен композита, способствуют отклонению трещин.

СЭМ-микрофотографии микроструктуры поверхности спеченных образцов после термического травления представлены на рис. 2 (А – Е). Исходя из представленных снимков можно увидеть, что у образцов, спеченных при температуре 1900 °С (рис. 2 (А, Б)), наблюдаются поры, подтверждая их недостаточную плотность. При повышении температуры спекания у боркарбидных композитов, не содержащих графен, увеличивается размер зерен V₄C (рис. 2 (А, В, Д)), но у упрочненных образцов (рис. 2 (Б, Г, Е)) отчетливо заметно их снижение.

Таким образом добавление оксида гра-

фена в боркарбидную матрицу одновременно повышает прочность и трещиностойкость спеченных композитов, а также снижает температуру спекания до 1950 °С, достаточную для создания плотного материала с улучшенными механическими свойствами, что открывает новые возможности для применения боркарбидных композитов, упрочненных графеном, во многих отраслях промышленности.

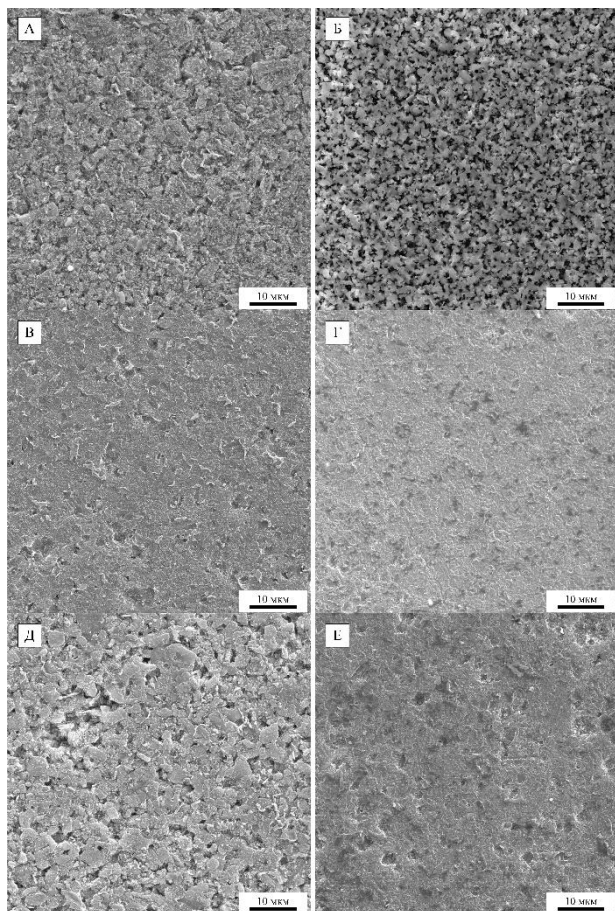


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности образцов B_4C и $B_4C-0,5OG$ после термического травления, спеченных при температурах: 1900 (А, Б), 1950 (В, Г) и 2000 (Д, Е)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.574.21.0179 от 26 сентября 2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0179.

Список литературы

1. Thevenot F. A review on boron carbide / Thevenot F. // Key Engineering Materials. – 1991. – Vols. 56-57. – P. 59–88.
2. Suri A.K. Syntesis and consolidation of boron carbide: a review / Suri A.K., Subramanian C., Sonber J.K., Murthy T.S.R.Ch. // International Materials Reviews. – 2010. – Vol. 55. – P. 4–40.
3. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress / Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M. // Journal of the American Ceramic Society. – 2011. – Vol. 94. – Issue 11. – P. 3605–3628.
4. Roy T.K. Pressureless sintering of boron carbide / Roy T.K., Subramanian C., Suri A.K. // Ceramics International. – 2006. – Vol. 32. – Issue 3. – P. 227–233.
5. Angers R. Hot-pressing of boron carbide / Angers R., Beauvy M. // Ceramics International. – 1984. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 49–55.
6. Spark plasma sintering of nanostructured powder materials / Smirnov A.V., Yushin D.I., Peretyagin P.Y. et. al. // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (3). P. 249–254.
7. Разработка цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / Григорьев С.Н., Грецишников В.А., Волосова М.А. и др. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2018. – № 4 (47). С. 87–93.
8. Microstructural design of Al_2O_3-SiC nanocomposites by spark plasma sintering / Alvarez I., Torrecillas R., Solis W. et. al. // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42. – Is.15. – P. 17248–17253.
9. Spark plasma sintering of zirconia/nano-nickel composites / Gutierrez-Gonzalez C.F., Torrecillas R., Agouram S. et. al. // Mechanics and Industry. – 2015. – Vol. 16 (7). – P. 5.
10. Unprecedented simultaneous enhancement in damage tolerance and fatigue resistance of zirconia/Ta composites / Smirnov A., Beltran J.I., Rodriguez-Suarez T. et. al. // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7 (1). – P. 1–13.
11. Geim A.K. The Rise of Graphene / Geim A.K., Novoselov K.S. // Nature Materials. – 2007. – Vol. 6. – P. 183–191.
12. Effect of graphene addition on the mechanical and electrical properties of $Al_2O_3-SiC_w$ ceramics / Grigoriev S., Peretyagin P., Smirnov A. et. al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – Vol. 37. – Issue 6. – P. 2473–2479.
13. Wear behavior of graphene/alumina composite / Gutierrez-Gonzalez C.F., Smirnov A., Centeno A. et. al. // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41 (6). – P. 7434–7438.
14. Волосова М.А. Моделирование силовых параметров при торцевом фрезеровании закаленной стали инструментом с керамической режущей частью / Волосова М.А., Гурин В.Д., Селезнев А.Е. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 4 (35) – С. 30–35.
15. Yin B.Y. Study on physical properties of hot-pressing sintered B_4C ceramic / Yin B.Y., Wang L.S. // Atomic Energy Science and Technology. – 2004. – Vol. 38 (5). – P. 429–431.

16. Electrically conductor black zirconia ceramic by SPS using graphene oxide / Solis N.W., Peretyagin P., Torrecillas R. et. al. // *Journal of Electroceramics*. – 2017. – Vol. 38. – P. 119–124.
17. Effect of drying methods of alumina powder and graphene oxide mixture on the mechanical and electrical properties of sintered composites fabricated by spark plasma sintering / Fokin P.V., Solis Pinargote N.W., Kuznetsova E.V. et. al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2018. – Vol. 9. – Issue 5. – P. 930–936.
18. Козочкин М.П. Исследование эффектов вибрационного точения с применением СОТС / Козочкин М.П., Солис Пинарготе Н.В. // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2014. – № 4 (31). – С. 67–73.
19. Wear behavior of graphene-reinforced alumina-silicon carbide whisker nanocomposite / Smirnov A., Peretyagin P., Solis Pinargote N.W. et. al. // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9 (2). – P. 151–161.
20. Исследование влияния добавления оксида графена на микроструктуру, механические свойства и электропроводность оксидной керамики ZrO_2 , полученной методом искрового плазменного спекания / Перетягин Н.Ю., Смирнов А., Кузнецова Е.В. и др. // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2018. – № 4 (47). – С. 76–80.
21. Маслов А.Р. Характеристики инновационных режущих материалов, полученных методом искрового плазменного спекания / Маслов А.Р., Пристинский Ю.О., Смирнов А. // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2017. – № 2 (41). – С. 52–55.
- plasma sintering. *Ceramics International*, 2016, Vol. 42, Is.15, P. 17248–17253.
9. Gutierrez-Gonzalez C.F., Torrecillas R., Agouram S. et. al. Spark plasma sintering of zirconia/nano-nickel composites. *Mechanics and Industry*, 2015, Vol. 16 (7), P. 5.
10. Smirnov A., Beltran J.I., Rodriguez-Suarez T. et. al. Unprecedented simultaneous enhancement in damage tolerance and fatigue resistance of zirconia/Ta composites. *Scientific Reports*, 2017, Vol. 7 (1), P. 1–13.
11. Geim A.K., Novoselov K.S. The Rise of Graphene. *Nature Materials*, 2007, Vol. 6, P. 183–191.
12. Grigoriev S., Peretyagin P., Smirnov A. et. al. Effect of graphene addition on the mechanical and electrical properties of Al_2O_3 - SiC_w ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, Vol. 37, Issue 6, P. 2473–2479.
13. Gutierrez-Gonzalez C.F., Smirnov A., Centeno A. et. al. Wear behavior of graphene/alumina composite. *Ceramics International*, 2015, Vol. 41 (6), P. 7434–7438.
14. Volosova M.A., Gurin V.D., Seleznev A.E. Force parameters modeling for face milling of hardened steel by tool with ceramic insert. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2015, No. 4 (35), pp. 30–35.
15. Yin B.Y., Wang L.S. Study on physical properties of hot-pressing sintered B_4C ceramic. *Atomic Energy Science and Technology*, 2004, Vol. 38 (5), P. 429–431.
16. Solis N.W., Peretyagin P., Torrecillas R. et. al. Electrically conductor black zirconia ceramic by SPS using graphene oxide. *Journal of Electroceramics*, 2017, Vol. 38, P. 119–124.
17. Fokin P.V., Solis Pinargote N.W., Kuznetsova E.V. et. al. Effect of drying methods of alumina powder and graphene oxide mixture on the mechanical and electrical properties of sintered composites fabricated by spark plasma sintering. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, Vol. 9, Issue 5, P. 930–936.
18. Kozochkin M.P., Solis-Pinargote N.W. Analysis of the effects of vibration turning with the use of coolant. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2014, No. 4 (31), pp. 67–73.
19. Smirnov A., Peretyagin P., Solis Pinargote N.W. et. al. Wear behavior of graphene-reinforced alumina-silicon carbide whisker nanocomposite. *Nanomaterials*, 2019, Vol. 9 (2), P. 151–161.
20. Peretyagin N.Y., Smirnov A., Kuznetsova E.V. et. al. Effect of graphene oxide addition on the microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of ZrO_2 ceramics obtained by spark plasma sintering. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2018, No. 4 (47), pp. 76–80.
21. Maslov A.R., Pristinskyi Ju.O., Smirnov A. Characteristics of innovative cutting materials received by spark plasma sintering. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2017, No. 2 (41), pp. 52–55.

References

1. Thevenot F. A review on boron carbide. *Key Engineering Materials*, 1991, Vols. 56-57, P. 59–88.
2. Suri A.K., Subramanian C., Sonber J.K., Murthy T.S.R.Ch. Syntesis and consolidation of boron carbide: a review. *International Materials Reviews*, 2010, Vol. 55, P. 4–40.
3. Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, Vol. 94, Issue 11, P. 3605–3628.
4. Roy T.K., Subramanian C., Suri A.K. Pressureless sintering of boron carbide. *Ceramics International*, 2006, Vol. 32, Issue 3, P. 227–233.
5. Angers R., Beauvy M. Hot-pressing of boron carbide. *Ceramics International*, 1984, Vol. 10, Issue 2, P. 49–55.
6. Smirnov A.V., Yushin D.I., Peretyagin P.Y. et. al. Spark plasma sintering of nanostructured powder materials. *Russian Engineering Research*, 2016, Vol. 36 (3), P. 249–254.
7. Grigoriev S.N., Grechishnikov V.A., Volosova M.A. et. al. Solid ceramic end milling cutters for hard-to-cut-materials machining. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2018, No. 4 (47), pp. 87–93.
8. Alvarez I., Torrecillas R., Solis W. et. al. Microstructural design of Al_2O_3 - SiC nanocomposites by spark

УДК 658.512.6

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СОВМЕСТНО СО СТАНОЧНЫМ ПАРКОМ

М.А. Шутиков¹, А.Н. Феофанов¹¹ ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В статье указано, что применение средств автоматизации производства является актуальным в настоящий момент. Для решения задач составления производственного расписания и оптимальной загрузки оборудования используются MES-системы. Описаны задачи, которые решают MES-системы, указаны преимущества от внедрения системы оптимальной загрузки измерительного оборудования совместно со станочным парком. Сформулировано, что в случае выявления брака продукции MES-система автоматически составит производственное расписание с учетом необходимости исправления бракованных изделий или изготовления новых изделий взамен забракованных. Указано, что внедрение MES-систем является актуальным в аспекте развития инструментов Индустрии 4.0.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, MES-системы, автоматизация, производство.

IMPLEMENTATION OF AUTOMATED SYSTEM OF CALCULATION OF INDUSTRIAL SCHEDULE OF MEASURING EQUIPMENT TOGETHER WITH THE MACHINE PARK

M.A. Shutikov¹, A.N. Feofanov¹¹ FGBOU VO "MSTU" STANKIN", Moscow, Russian Federation

Abstract

The article states that the use of automation of production is relevant at the moment. MES systems are used to solve production scheduling and optimal equipment loading tasks. The tasks that MES-systems solve are described, the advantages of introducing the system of optimal loading of measuring equipment together with machine park are indicated. It was formulated that in case of detection of product defects, the MES-system will automatically compile a production schedule taking into account the need to correct defective products or manufacture new products instead of rejected ones. It is indicated that the introduction of MES-systems is relevant in the aspect of the development of Industry 4.0 instruments.

Keywords: Industry 4.0, MES-systems, automation, manufacturing.

В современных условиях конкурентоспособность предприятия определяется многими показателями. Одним из ключевых показателей является повышение оперативности функционирования предприятия. В настоящее время одним из ключевых ресурсов является информация, которая генерируется в процессе функционирования предприятия [1]. Для ее обработки, анализа, интерпретации используются различные автоматизированные системы, например, системы расчёта производственного расписания.

Такие системы применяются для оптимальной загрузки оборудования всего предприятия, рассчитывают производственное расписание и выполняют его перерасчет в случае отклонения от нормального функционирования технологических процессов [2]. Системы автоматизации позволяют снизить количество ошибок, связанных с человеческим фактором, повысить эффективность проведения различных технологических операций, в том числе, сократить время на их проведение и количество брака [3].

Системы автоматизированного составления оптимального производственного расписания MES (Manufacturing Execution System) системы являются специализированным прикладным программным обеспечением, предназначенным для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках какого-либо производства. Они планируют технологические операции, выполняемые на определенных рабочих местах. К основным задачам, которые решают системы этого класса, можно отнести задачи оптимизации, оперативного планирования, управления производственными процессами, оперативного перерасчета производственного расписания. Получая информацию от технологических систем и производственно-технологических линий предприятия, обобщая и интерпретируя ее, MES-системы служат инструментом повышения эффективности всей производственной деятельности организации, начиная от формирования производственного заказа и до отгрузки готовой продукции на склады, а также позволяют эффективно загружать оборудование за счет расчета оптимального производственного расписания выполняемых на нем работ [4]. Также MES позволяет перерасчитывать расписание в случае выхода из строя какого-либо оборудования. Эвристические алгоритмы расчета производственных расписаний являются ядром MES систем и охраняются в режиме ноу-хау.

К принципам на которых базируются теоретические основы построения системы автоматизированного расчета производственного расписания относятся:

- перерасчет производственного расписания исходя из складывающейся на предприятии производственной ситуации;
- поставка сырья на технологические линии точно в срок согласно стратегии «Just-in-Time» (снижение запасов на складе, повышение оперативности производства);
- повышение коэффициента загрузки оборудования (уменьшение времени простоя, оптимизация времени на вспомогательные операции);

- значительное повышение производительности оборудования (увеличение выпуска продукции на оборудовании, приводящее к повышению его рентабельности);

- комплексное снижение затрат на производство.

Результатом всех вышеперечисленных составляющих является получение конкурентных преимуществ. В основном, MES-системы применяются для станочного оборудования [5]. По данным статистики MES обеспечивает:

- снижение продолжительности цикла производства в среднем на 45%;
- сокращение времени ввода данных, обычно на 75% или более;
- сокращение количества незавершенной продукции в среднем на 24%;
- снижение объема бумажной отчетности между сменами в среднем на 61%;
- сокращение времени освоения новой продукции в среднем на 27%;
- сокращение бумажной документации в среднем на 56%;
- сокращение объема брака в среднем на 18% [6].

Как уже было отмечено, современное производство – это сложный комплексный процесс, зависящий от множества факторов и включающий в себя множество элементов [7]. Таким образом, в процессе функционирования сложных технологических процессов, конечной целью которых является изготовление изделия, неминуемо возникнет брак, обусловленный определенными несоответствиями в ходе производства. Как правило, процессом контроля изготовленной продукции занимаются сотрудники отдела технического контроля, используя при этом различное автоматизированное контрольно-измерительное оборудование (координатно-измерительные машины, микроскопы, длиноты и т.д.). После проведения контроля в случае обнаружения брака необходимо принять меры, направленные на устранение выявленных бракованных изделий. Возможно два варианта: изделия невозможно отремонтировать, и тогда они помещаются в изолятор брака, а вместо них изготавливается недостающее количество продукции.

Так же возможен случай, когда изделия можно исправить, и тогда они направляются на доработку. В обоих случаях требуется вмешательство в функционирование существующих технологических процессов предприятия, что неминуемо приведет к внесению изменений в производственное расписание [8]. В современных условиях крупносерийного и массового производства, когда в процессе изготовления изделий может быть задействовано несколько десятков технологических линий, сотни станков и множество систем, обеспечивающих производственную деятельность предприятия, перерасчет производственного расписания является крайне трудоемкой задачей, которую выполнить без помощи автоматизированных систем выполнить практически невозможно [9]. Именно поэтому применение MES-систем для измерительного оборудования совместно со станочным парком является актуальным на сегодняшний день.

В случае интеграции измерительного автоматизированного оборудования с MES-системой возникает возможность в автоматическом режиме передавать в нее данные о контроле изделий, что повышает оперативность и снижает ошибки, связанные с человеческим фактором [10]. В случае обнару-

жения бракованной продукции информация о ней обрабатывается MES-системой, и после анализа система производит перерасчет производственного расписания станочного парка предприятия таким образом, чтобы обеспечить его оптимальную загрузку и при этом минимизировать влияние на существующие технологические процессы предприятия (рис. 1).

Применение MES-системы почти полностью исключает необходимость в бумажной отчетности, что позволяет снизить ошибки, связанные с человеческим фактором и непреднамеренным дублированием документов [11]. Кроме того, есть возможность переносить протоколы в систему электронного документооборота, что повышает удобство передачи и поиска протоколов, а также дает возможность архивации и однозначной идентификации протоколов в едином информационном пространстве предприятия [12]. Так же, система повышает прозрачность функционирования предприятия, что необходимо для того, чтобы предоставить возможность уполномоченным сотрудникам предприятия (представителям заказчика) контролировать ход выполнения производственных процессов и быть уверенным в том, что запланированная к производству продукция с высокой долей вероятности будет изготовлена в срок.

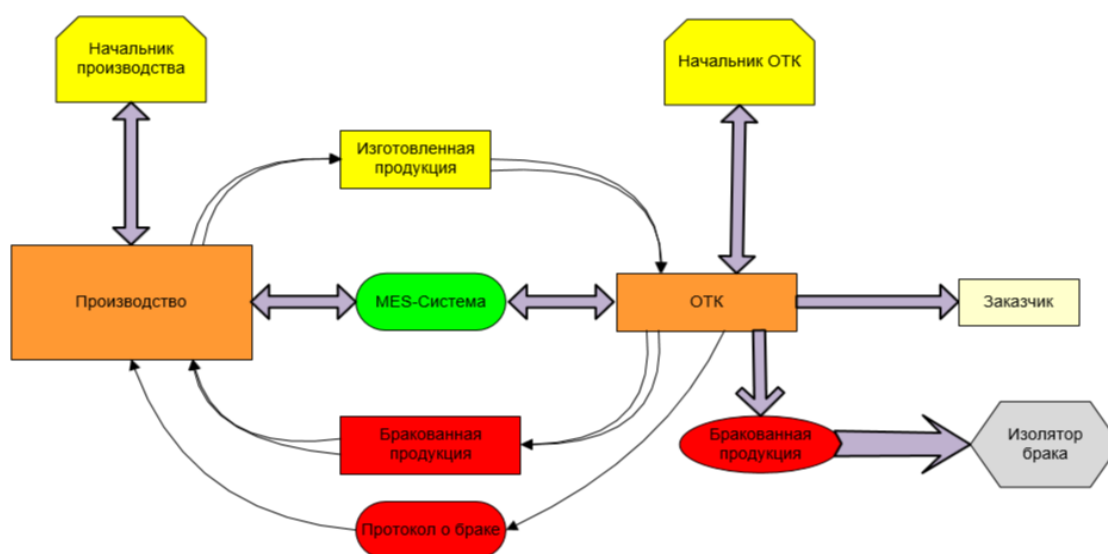


Рис. 1. Процесс интеграции MES-системы в технологическую деятельность предприятия

Конечно, применение MES-системы накладывает определенные требования к обеспечению достоверности и защиты информации, поступающей на обработку [13]. В случае искажения данных существует риск расчета производственного расписания, которое не будет являться оптимальным, а значит, снизит эффективность функционирования предприятия, что может привести к финансовым потерям и репутации самой организации в целом [14].

Список литературы

1. Феофанов А.Н. Организация виртуального предприятия – будущее производства. / А.Н. Феофанов, Е.Ю. Бондарчук, С.А. Тясто // «ВЕСТНИК МГТУ «Станкин» - 2018. № 3 (46) – стр. 101-105.
2. Соломенцев Ю.М. Оперативное планирование и управление машиностроительным производством на основе исполнительных производственных систем. / Ю.М. Соломенцев, Е.Б. Фролов, А.Н. Феофанов // Вестник машиностроения. - 2017. - № 8. - стр. 41-43.
3. Петров П.С. База знаний для разработки универсально- сборных приспособлений для станков с ЧПУ. / П.С. Петров, А.Н. Феофанов, А.В. Рыбаков // «ВЕСТНИК МГТУ «Станкин». - 2016. – стр. 25-28.
4. Соломенцев Ю.М. Эффективное управление производством – основа потенциала технологической системы. / Ю.М. Соломенцев, Е.Б. Фролов, А.Н. Феофанов // Вестник машиностроения. – 2017. - №5. - стр.84–86.
5. Феофанов А. Н. Применение MES-систем для контроля геометрических параметров подшипников. / А.Н. Феофанов, М.А. Шутиков, К.С. Пономарев // «ВЕСТНИК МГТУ «Станкин». - 2018. – № 4 (47). - стр. 119-121.
6. Калужный И.О. Новые подходы к внедрению mes-систем с использованием концепции многокомпонентной модели предприятий. / И.О. Калужный, Ф.Г. Нассибуллин, О.Н. Силенко. // Нефтяное хозяйство. – 2013. – №5. - стр. 90-93.
7. Левыкин И.В. Реализация задачи загрузки оборудования методом теории расписания в mes-системах. / И.В. Левыкин, И.А. Куш. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. - №10 (49). – стр. 26-28.
8. Фролов Е.Б. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в MES-системах. / Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин // Станочный парк. – 2008. - № 11. - стр. 22-27
9. Феофанов А.Н. Разработка производственных исполнительных систем в условиях цифрового производства. / А.Н. Феофанов, М.А. Шутиков,

Внедрение MES-систем является актуальным в аспекте развития инструментов Индустрии 4.0. [15] Применение систем автоматизированного расчета производственного расписания создает предпосылки для создания единой информационной платформы управления предприятием, что является одним из аспектов перехода к цифровой экономике.

- К.С. Пономарев // Вестник машиностроения. – 2018. - № 9. - стр. 25-29.
10. Феофанов А. Н. Создание мобильного портала для организации работы предприятия / А.Н. Феофанов, И.Ю. Юнин, Ю.М. Соломенцев. // Технология машиностроения. – 2012. – №5 – стр.70-73.
11. Бухаров В.А. Опыт внедрения системы управления производством. // РИТМ Машиностроения. - 2018. - №8. - стр. 27-30.
12. Клим М.И. Зачем гиганту MES-система. Опыт одного внедрения. // Журнал «ИСУП». - 2016. - № 5(65)
13. Магамадалиев Э. А. Разработка методов и средств проектного управления машиностроительным автоматизированным мелкосерийным производством: дис. канд. техн. наук. – Махачкала, 2008. – стр. 5.
14. Шутиков М.А. MES-система как инструмент автоматизированного планирования производственного расписания при изготовлении и контроле продукции в современных условиях Индустрии 4.0 / М.А. Шутиков, Феофанов А.Н. // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – 2019. – стр. 175-179.
15. Соломенцев Ю.М., Р.Р. Загидуллин, Фролов Е.Б. Планирование в современных системах управления производством // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – №4. – стр. 77-87.

References

1. Feofanov A.N., Bondarchuk E.Y., Tyasto S.A. The organization of a virtual enterprise — the future of production. “Vestnik of MSTU “Stankin”, 2018, No 3 (46) – pp. 101-105.
2. Solomentsev Yu. M., Frolov E.B., Feofanov A.N. Operational planning and management of machinery production basing on executory production systems. Russian engineering research, 2017, No 8, pp. 41-43.
3. P.S. Petrov, A.N. Feofanov, A.V. Rybakov. Building the knowledge base in the development of universal modular devices for CNC. “Vestnik of MSTU “Stankin”, 2016, No 1 (36), pp. 25-28

4. Solomentsev Yu. M., Frolov E.B., Feofanov A.N. Effective production management - basis of manufacturing system potential. Russian engineering research, 2017, No 5, pp. 84-86.
5. Feofanov A.N., Shutikov M.A., Ponomarev K.S. Application of MES-systems for control of geometrical parameters of bearings. "Vestnik of MSTU "Stankin", 2018, No 4 (47), pp. 119-121.
6. I.O. Kalyuzhny, F.G. Nasibullin, O.N.Silenko. New approaches to the implementation of manufacturing execution systems with use of the concept of a multi-component model of enterprises. Neftyanoe Khozyaystvo, 2013, No 5, pp. 90-93
7. Levykin I.V., Kusch I.A. Implementing the task of downloading the equipment by the theory of scheduling in MES-systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2011, No 10, pp. 26-28.
8. Frolov E.B., Zagidullin R.R. Operativno-kalendarnoe planirovanie i dispetchirovanie v MES-sistemakh. Stanochnyi park, 2008, No 11 (56) pp. 22-27.
9. Feofanov A.N., Shutikov M.A., Ponomarev K.S. Development of production executive systems in digital production conditions. Russian engineering research, 2018, No 9, pp. 25-29.
10. Feofanov A.N. Creating a mobile portal for the organization of the enterprises activity / A.N. Feofanov, I. Yu. Unin, Yu.M.Solomentsev // Tekhnologiya Mashinostroeniya, 2012, No 5, pp.70-73.
11. Buharov V.A. Experience in implementing a production management system // Rhythm of Machinery, 2018, No. 8, pp. 27-30. [in Russian language]
12. Klim M.I. Why would a giant must MES-system have? One implementation experience // Magazine "ISUP", 2016, No. 5 (65), [in Russian language]
13. Magomedaliyev E. A. Development of methods and tools for project management of machine-building automated small-scale production: - Makhachkala, 2008. – p. 5
14. Shutikov M.A., Feofanov A.N. MES-system as a tool for automated scheduling of production schedules in the manufacture and control of products in modern conditions of Industry 4.0 // Current trends and prospects for the development of science, technology, technology: collection of scientific papers on the materials of the International scientific and practical conference. 2019, pp. 175-177.
15. Solomencev Yu. M., Zagidullin R.R. Frolov E.B., Feofanov A.N. Planning in modern managerial system by production. // Information Technologies and Computing Systems, 2010, No 4, pp. 77-78.

УДК 621.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦА ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

М.А. Тамаркин¹, Е.Н. Колганова², А.В. Федоров²¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на Дону, Российская Федерация² ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, Российская Федерация

Аннотация

Обосновывается актуальность исследований отделочно-зачистной обработки малоразмерных деталей радиоэлектронной аппаратуры. Показано, что виброабразивная обработка является наиболее эффективным методом удаления заусенцев у малоразмерных деталей с труднодоступными поверхностями и имеет ряд преимуществ перед прочими способами, так как обработка подобных деталей представляет собой сложную, трудно решаемую задачу в связи с затруднением доступа рабочей среды и загибанием заусенцев внутрь пазов и отверстий. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса удаления заусенца при вибрационной обработке деталей. Проведенные эксперименты подтвердили адекватность предложенных моделей съема заусенца.

Ключевые слова: шлифование, подсистема, входной вектор, качество поверхности, износ круга, зубья протяжки.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF REMOVING A BURR AT VIBRATION TREATMENT OF DETAILS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

M. A. Tamarkin¹, E. N. Kolganova², A.V. Fedorov²¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation² North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

Abstract

The urgency of the investigation of finishing and deburring treatment of small parts of radio electronic equipment is justified. It is shown that vibro-abrasive treatment is the most effective method of small parts with hard-to-reach areas deburring and has a number of advantages over other methods since treatment of the parts of this kind is a complicated and hard-to-solve task due to difficult access to the operating area and bending of burrs inside grooves and holes. The results of theoretical and experimental investigations on the process of deburring during vibration treatment of parts are presented. The experiments performed have confirmed the relevance of the suggested models of deburring.

Keywords: vibration treatment, medium of organic origin, roughness, microroughness of the surface, burrs, edge rounding.

Всё более возрастающая сложность машин и приборов машиностроения, особенно в приборостроении, в настоящее время выдвигает актуальную проблему повышения и обеспечения их надежности, долговечности и качества.

Современные методы компоновки и продолжающееся усложнение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), уменьшение материалоемкости и потребления энергии этой аппаратурой являются важнейшим фактором, ведущим по пути уменьшения диамет-

ральных и линейных размеров комплектующих. В конструкцию современных приборов входят группы высокоточных деталей, надежность которых в большей степени определяет долговечность работы всего прибора. Существенное количество подобного рода деталей обладают сложной формой, миниатюрными размерами, ограниченной жесткостью, пазами и отверстиями сложной конфигурации в труднодоступных местах, а также высокими требованиями к

параметрам качества поверхности и поверхностного слоя.

Одной из основных причин выхода из строя приборов РЭА являются дефекты изготовления деталей, образующиеся в результате формообразования их поверхностей. Заусенцы затрудняют сборку изделий, приводят к повреждению сопрягаемых поверхностей и проводов и в конечном итоге к нарушению эксплуатационных характеристик прибора. Согласно международному и отраслевым стандартам [1, 2] все заготовки должны быть очищены от окалины, заусенцы удалены, острые кромки притуплены. Недостаточная подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытия (заусенцы, острая кромка, наличие загрязнений) приводит к ухудшению адгезии, образованию наростов на поверхности деталей.

Сопоставление различных методов обработки мелкогабаритных деталей, а также деталей с малыми пазами и отверстиями показало, что наиболее перспективным и производительным методом отделочно-зачистной обработки (ОЗО) является виброабразивная обработка (ВиО) в свободных абразивных средах. Виброабразивная обработка в зависимости от характеристики и состава обрабатываемой рабочей среды представляет собой механический или механохимический процесс съема мельчайших частиц металла и его окислов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживания микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение. Соударение осуществляется под различными углами (0-90°). По технологическому назначению вибрационная обработка относится к безразмерным методам, т.к. обработка производится в основном в пределах исходной шероховатости; по виду применяемого инструмента ВиО относится к группе методов обработки свободным абразивом. Схема вибрационной обработки представлена на рис. 1.

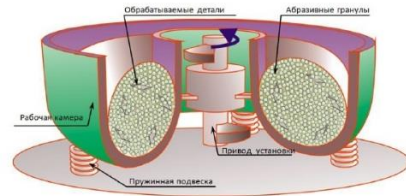


Рис. 1. Схема вибрационной обработки

Созданы теоретические модели, позволяющие рассчитывать производительность и качество обработки свободным абразивом в зависимости от основных технологических факторов, то есть режимов обработки и характеристик рабочих сред. Однако, обработка деталей, имеющих малые пазы и отверстия с труднодоступным расположением заусенцев значительно усложнена и исследована недостаточно полно. Наибольший интерес в этой области представляют работы А.П.Бабичева [3, 4], М.А.Тамаркина [5], а также зарубежных специалистов Н.Матсунаги, У.Хагиуды (Япония), К.Велингера (Германия), В.Брандта (США), Г.Бернейдера (Германия) и многих других.

Процесс единичного резания при абразивной обработке рассматривается во многих работах [3, 6, 5], так как он является основополагающим, раскрывает сущность абразивного воздействия и даёт возможность определить оптимальные технологические режимы обработки деталей машин.

При исследовании основных технологических параметров ВиО (производительности процесса и качества обработанной поверхности) одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемой детали. При построении модели процесса единичного взаимодействия при ВиО, воспользуемся методикой, предложенной М.А.Тамаркиным [5].

Заусенцы – это излишки материала, выступающие на кромках и углах поверхностей детали, в виде гребенок с рваными краями толщиной более 0,01 мм, образующиеся в результате сдвига металла при штамповке и обработке резанием.

Признанным определением заусенца является определение проекта международно-

го стандарта. Заусенец – пластически деформированный материал, образованный на кромках детали в результате обработки резанием или резки (вырубки). Заусенец включает весь металл, выступающий за теоретическое пересечение двух поверхностей, которые прилегают к заусенцу. В некоторых случаях заусенец внутри теоретического пересечения. Заусенец может быть острым, рваным, прочно закрепленным или свободно висящим выступом. Это может быть также выпуклость материала на кромке [2].

Анализ исследований различных ученых показал, что образование заусенцев происходит вследствие пластической деформации впереди зоны резания обычно в двух направлениях одновременно – в направлении главного движения и в направлении подачи [7, 8, 9].

В рамках данного исследования проведено исследование удаления заусенца для специфичной группы деталей, производимых одним из приборостроительных предприятий. Заусенцы, образующиеся при типовых методах обработки, характерных для данного предприятия, обладают общими признаками, определение которых, дает возможность назначить методику и рекомендации для определения времени их удаления, и повысить таким образом эффективность технологического процесса их обработки. Для исследования процесса удаления заусенца определены геометрические параметры заусенцев для выборки деталей приборов РЭА, а также форма их поперечного сечения.

Экспериментально установлено, что высоты заусенцев деталей приборов в среднем превышают величину толщины заусенца у основания в 2-3 раза, а толщина заусенца у основания не превышает 0,3 мм. Поперечное сечение заусенцев, имеет форму близкую к треугольной (рис.2). Они имеют стабильное основание, не имеют слабых мест и трудно поддаются обламыванию.



Рис.2. Типичные формы заусенцев, образующихся у деталей приборов РЭА

Анализ исследований процессов ВиО в среде абразива [1] показал, что многочисленные результаты недостаточно полно описывают происходящие процессы при удалении заусенцев заготовок в среде свободного абразива. Большим препятствием при проектировании и внедрении технологических процессов для данных методов обработки является недостаточная изученность особенностей взаимодействия гибкой гранулированной абразивной среды с поверхностью кромок заготовок, имеющих заусенцы.

Проведены теоретические исследования процесса удаления заусенца свободным абразивом. При расчете съема металла в гранулированных рабочих средах очень важное значение имеет учет вероятности покрытия каждой точки поверхности детали пятном контакта с абразивной гранулой. Получены аналитические зависимости для определения вероятности покрытия обрабатываемой поверхности пятнами контакта при обработке поверхностей миниатюрных деталей.

Как при обработке связанным абразивом (шлифование, хонингование и т.п.), так и при обработке свободными абразивными зернами, описание процесса резания возможно при использовании методов теории вероятности. Так как в случае обработки очень малых деталей, либо их отдельных участков (заусенцев), когда площадь детали или участка меньше площади квадрата упаковки – величина геометрической вероятности P_1 на участке длиной $2R$ определяются следующим образом

$$P_1' = \frac{\pi ab}{2RL_0} \quad (1)$$

Вычислив величину a и b можно рассчитать площадь следа абразивной частицы на поверхности детали, и, следовательно, вероятность того, что любая точка квадрата упаковки покроется пятном контакта – P_1 .

Определение времени обработки является одной из важнейших задач технологии машиностроения, без решения которой невозможно проектирование технологических процессов. Время обработки деталей играет важную роль в процессе формирования качества поверхностного слоя при вибрационной обработке заготовок с малыми пазам и

отверстиями. Процесс удаления заусенцев на малоразмерных заготовках и деталях из цветных металлов и сплавов представляет определенные трудности вследствие большого многообразия форм контуров, необходимости удаления материала на небольших участках и др. А также в связи с тем, что необходимо избежать так называемой «переработки», появляющейся после того, как все заусенцы уже удалены, и приводящей к разрушению детали.

При проведении оптимизации технологических параметров обработки, в качестве целевой функции чаще всего используют производительность либо себестоимость процесса, что в свою очередь вызывает необходимость получения как можно более точной математической модели расчета времени обработки.

Следует отметить, что на время и процесс удаления заусенцев существенное влияние оказывает их размеры и геометрия. В работе [3] влияние размера и конфигурации заусенца названо ключевым в исследовании процесса его удаления.

Как установлено ранее [5] при обработке свободными абразивами заусенец, имеющийся на детали в начальный период обработки, либо обламывается у основания, либо деформируется и прижимается к поверхности детали. Затем происходит подрезание его у основания, основная часть заусенца отваливается, а основание постепенно удаляется с дальнейшим скруглением острой кромки.

При этом условно было принято, что в среднем высота такого заусенца приравнивалась к его толщине.

Результаты экспериментального исследования, показали, что профиль поперечного сечения заусенца представляет собой треугольник, при этом высота заусенца в среднем превышает величину толщины заусенца у основания в 2-3 раза.

Так как от геометрической формы поперечного сечения заусенца зависит объем удаленного металла, и как следствие, время и производительность обработки, то на основании выше приведенной зависимости

необходимо разработать методику уточненного расчета времени удаления заусенца.

С учетом того обстоятельства, что с увеличением толщины заусенца в его основании геометрическая вероятность P_1 изменяется по пропорциональному закону может возникнуть два случая расчета времени удаления заусенца: 1. Когда заусенец удаляется с геометрической вероятностью $P_1=1$, т.е. наблюдается наибольшая интенсивность съема материала заусенца и выполняется условие для соотношения диаметра гранулы к величине заусенца у основания более чем в 220 раз; 2. Когда время удаления заусенца рассчитывается в несколько этапов: первый этап – этап высокой интенсивности, второй – переходная интенсивность и третий этап – установившейся интенсивности обработки. В данном случае соотношение диаметра гранулы к величине заусенца у основания менее 220 и расчет проводится с учетом диапазона изменения соотношения диаметра гранулы к величине основания заусенца.

В первом случае геометрическая форма сечения заусенца представляет собой треугольник (рис. 3), где толщина заусенца у основания равна L_0 и высота $h_{заяс.}$, откуда площадь поверхности поперечного сечения заусенца: $S = \frac{1}{2} L_0 h_{заяс.}$,

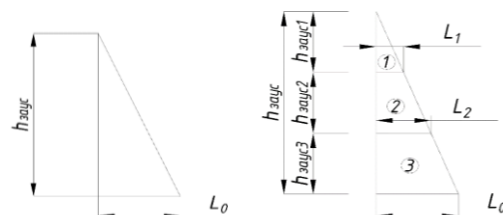


Рис. 3. Сечение заусенца, представленное в виде треугольника

Объем металла, который необходимо удалить на участке, длина которого равна диаметру абразивной частицы $2R$

$$W_z = RL_0 h_{заяс.} \quad (2)$$

Так как согласно зависимости объем металла, который удаляется за время t_3 : $W_z = P_1 P_2 f_6 t_3 V$

можно записать в следующем виде:

$$RL_0 h_{заяс.} = P_1 P_2 f_6 t_{заяс.} V \quad (3)$$

Геометрическая вероятность P_1 для данной стадии расчета равна единице. Время удаления заусенца составит

$$t_{заяс1} = \frac{h_{заяс} \cdot L_0 \cdot R}{P_z \cdot f_B \cdot V}. \quad (4)$$

При соотношении диаметра гранулы к величине заусенца у основания менее 222 необходимо проводить расчет времени съема заусенца с учетом диапазона изменения данного соотношения в несколько этапов (второй случай).

Для этого условно разобьем площадь треугольника заусенца на три элементарные геометрические формы: треугольник и две трапеции, как показано на рис. 4.

Геометрическая форма первого участка заусенца представляет собой прямоугольный треугольник с высотой $h_{заяс}$. Геометрическая форма второго участка поперечного сечения заусенца – трапеция с высотой $h_{заяс2}$. Геометрическая форма третьего участка заусенца – трапеция с высотой $h_{заяс3}$.

Определение времени для удаления первого участка аналогично расчету для первого случая, когда геометрическая вероятность P_1 равна единице:

$$t_{заяс1} = \frac{h_{заяс2} \cdot L_1 \cdot R}{P_z \cdot f_B \cdot V}. \quad (5)$$

Площадь сечения поверхности заусенца, представленного в виде трапеции:

$$S = \frac{L_2 + L_1}{2} h_{заяс2}. \quad (6)$$

Тогда объем металла, который необходимо удалить на участке, длина которого равна диаметру абразивной частицы $2R$:

$$W_3 = R(L_1 + L_2)h_{заяс2} \quad (7)$$

Тогда данную зависимость можно записать следующим образом:

$$R(L_1 + L_2)h_{заяс2} = P_1 P_2 f_B t_{заяс2} V \quad (8)$$

Аналогично получим зависимость, позволяющую определить время удаления третьего участка сечения заусенца, толщина заусенца у основания равна L_0 .

$$t_{заяс3} = \frac{2L_0 h_{заяс3} \cdot (L_0 + L_2) \cdot R}{P_z \cdot f_B \cdot V}. \quad (9)$$

Введя коэффициент k_3 , учитывающий особое расположение заусенца на детали и специфические условия взаимодействия абразивной частицы с его поверхностью, определим итоговое время удаления заусенца, которое будет являться суммой времени, необходимого для удаления всех трех его участков

$$t_{заяс} = k_{заяс} (t_{заяс1} + t_{заяс2} + t_{заяс3}). \quad (10)$$

Величина $k_{заяс}$ будет определена при проведении экспериментальных исследований.

С целью получения сравнительной оценки технологической эффективности вибрационной обработки в среде свободных абразивов нами были проведены экспериментальные исследования. Выбранные для исследования детали были разбиты на группы, исходя из их схожести по габаритным размерам, материалу, а также по конструктивным и технологическим признакам, в каждой группе были выделены наиболее типичные детали-представители.

Построены зависимости времени съема заусенца при вибрационной отделочной обработке, некоторые из них приведены на рис. 6. На графиках зависимостей сплошная линия - теоретическая кривая, точки – результаты экспериментальных исследований. Проведено сравнение расчетных значений теоретического и экспериментального исследований.

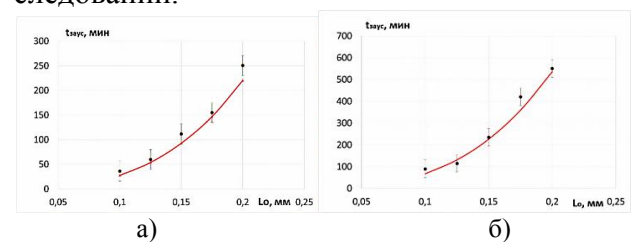


Рис.4. Зависимость времени удаления заусенца деталей из АМг6 (а) и латуни ЛС59-1 (б) от толщины заусенца у основания L_0 при $f=33$ Гц при использовании скорлупы ореха дробленой (а), фарфоровых шаров (б)

Выводы

Разработаны уточненные теоретические модели процесса удаления заусенца. Получены теоретико-вероятностные модели процесса единичного взаимодействия абразив-

ных гранул с поверхностью детали, позволяющие учесть влияние размера обрабатываемой детали на вероятность покрытия каждой точки поверхности пятном контакта. В результате проведения комплексных экспериментальных исследований подтверждена адекватность предложенных моделей съема заусенца при обработке свободным абразивом. Разница между экспериментальными и теоретическими данными не превышает 20 %.

Список литературы

1. ОСТ 4ГО.070.014-79. Детали радиоэлектронной аппаратуры; М.: ООО «Радиостандарт-ЦНИИРЭС». М., 1992. 15 с.
2. STD-01. WBTC.1996, draft. – Deburring Technology International, Inc., KansasCity, MO.
3. Бабичев А.П., Бабичев И. А. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д: Изд. Центр ДГТУ, 1998 - 624 с
4. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. - М.: Машиностроение, 1974- 134 с.
5. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дис... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995 г
6. Димов Ю.В. Обработка деталей свободным абразивом. - Иркутск: Издво ИрГТУ, 2000. - 293с.
7. Hashimura M., Chang Y.P., Dornfeld D. Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting. // Trans.ASME.J.Manuf.Sci and Eng. – 1999. – 121, №1 – P.1-7.
8. Link Rainer. Gratbildung und gratreduzierung beim zerspanen mit geometrisch definierter. // Olhydraul. Und Pneum. – 1991. – 35, №5 – P.422-428.
9. Wang Guicheng, Zhang Chunye. Cutting-direction burr formation in orthogonal precision. // Trans. Nanjing Uniu. Aeron. And Astron. 2001. 18, №2. - P.194-199.

References

1. OST 4TH.070.014-79. Details of electronic equipment; M: LLC "Radiostandart-TSNIRES". M., 1992. 15 c.
2. STD-01. WBTC.1996, draft. – Deburring Technology International, Inc., KansasCity, MO.
3. Babichev A. P., Babichev I. A. Fundamentals of vibration technology. Rostov n/A: Ed. DSTU center, 1998 - 624 p
4. Babichev, A. P., Vibrating processing of parts. - M.: mechanical engineering, 1974 - 134 p.
5. Tamarkin M. A. Theoretical bases of op-timization of processes of processing of details are free abrasives. Dis. doctor. Techn. sciences'. Rostov-on-don, 1995
6. Dimov, Yu. parts Processing free abrasive. - Irkutsk: Irgtu I, 2000. - 293c
7. Hashimura M., Chang Y.P., Dornfeld D. Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting. // Trans.ASME.J.Manuf.Sci and Eng. – 1999. – 121, №1 – P.1-7.
8. Link Rainer. Gratbildung und gratreduzierung beim zerspanen mit geometrisch definierter. // Olhydraul. Und Pneum. – 1991. – 35, №5 – P.422-428.
9. Wang Guicheng, Zhang Chunye. Cutting-direction burr formation in orthogonal precision. // Trans. Nanjing Uniu. Aeron. And Astron. 2001. 18, №2. - P.194-199.

УДК 658.012.011.56

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ВЫХОДНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ

Ю.К. Новосёлов¹, В.Б. Богуцкий¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье показано, что повышение эффективности эксплуатации шлифовального оборудования в автоматизированном производстве может быть достигнуто за счет совершенствования методов управления на основе использования при проектировании операций математических моделей, позволяющих прогнозировать изменения, возникающие в технологической системе. Оценку динамики параметров технологической системы и выходных переменных предлагается выполнять по их первым производным, случайные отклонения – с использованием законов распределения амплитуд и номера гармоники. Получены зависимости выходных переменных операции шлифования от параметров технологической системы, которые дают возможность оценить степень влияния изменений параметров состояния технологической системы на выходные переменные операции шлифования и определить минимальные интервалы времени для проведения коррекций управляющей программы.

Ключевые слова: автоматизированное производство, шлифование, абразивный инструмент, динамика технологической системы, число режущих кромок, съем материала, шероховатость поверхности.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF CHANGES IN THE PARAMETERS OF THE CONDITION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS ON OUTPUT VARIABLES OF THE GRINDING OPERATIONS

Yu.K. Novoselov¹, V.B. Bogutsky¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article shows that an increase in the operating efficiency of grinding equipment in automated production can be achieved by improving management methods based on the use when designing operations of mathematical models that make it possible to predict changes arising in a technological system. The evaluation of the dynamic parameters of technological systems and output variables is done based on their first derivatives, random deviation - using the distributions of the amplitudes and number of the harmonics. A received the dependencies of the output variables of the grinding operation on the parameters of the technological system are obtained, which make it possible to estimate the degree of influence of changes in the parameters of the state of the technological system on the output variables of the grinding operations and determine the minimum time intervals for carrying out corrections of the control program.

Keywords: automated production, grinding, abrasive tool, dynamics of the technological system, number of cutting edges, material removal, surface roughness.

Повышение эффективности эксплуатации шлифовального оборудования в автоматизированном производстве может быть достигнуто за счет совершенствования методов управления [1-6]. Одним из таких направлений является использование при проектировании операций математических моделей, позволяющих прогнозировать из-

менения, возникающие в технологической системе.

$$z_{i,j}(\tau) = z_{i,j-1} + A_i(j-1) + A_{zi}[\tau - \tau_c(j-1)] \quad (1)$$

где $j = \text{int}(\tau/\tau_u + 1)$ – номер цикла восстановления параметров системы; A_i – оператор, учитывающий восстановление i -го параметра системы после $j-1$ -го цикла; A_{zi} – оператор, определяющий изменение параметра z си-

стемы; τ_c – время одного цикла восстановления системы.

Для случайных отклонений

$$z_{i,j}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{kj}(\tau) \sin \left[2\pi k \frac{\tau - \tau_c(j-1)}{\tau_c} + \psi_k \right] \quad (2)$$

где A_{kj} – случайная амплитуда отклонений j -той гармоники; ψ_k – ее фаза.

Динамику параметров технологической системы и выходных переменных будем оценивать их первыми производными, случайные отклонения – параметрами законов распределения амплитуд A_k и номером гармоники k .

Точность станка, приспособлений для правки круга и закрепления заготовки при шлифовании с прибором активного контроля в основном влияют на отклонения формы обработанной поверхности δ_f . Суммарные отклонения не должны превышать величины допуска. Полагая, что выход за его пределы возможен при наихудшем состоянии δ_{fT} подсистем, запишем

$$\delta_{fT} = k_m \delta_f + k_{td} \delta_f + k_{te} \delta_f \quad (3)$$

где k_m , k_{td} , k_{te} – коэффициенты, определяющие долю допуска формы, предназначенную для компенсации погрешностей станка, приспособлений для правки круга и технологической оснастки для крепления заготовки.

Периоды работы станка и приспособлений до их замены или капитального ремонта соответственно обозначим T_m , T_{td} , T_{te} . Как правило, $T_{td} = T_m$, $T_{te} < T_m$ [7-9].

В связи с этим погрешности, вызванные износом станка и приспособления для правки, могут быть объединены, а погрешность технологической оснастки для крепления заготовки – выделена. В стадии установившегося процесса величина износа пропорциональна времени. В этом случае функционал (1) с учетом (3) может быть записан как

$$\delta_{m,td} = \delta_{m,td(0)} + [(k_m + k_{td})\delta_f - \delta_{m,td(0)}] \times \left(\frac{\tau - (j-1)T_m}{T_m} \right) \quad (4)$$

Первая производная (скорость изменения $\delta_{m,td}$) вычислится следующим образом:

$$\dot{\delta}_{m,td} = \frac{(k_m + k_{td})\delta_f - \delta_{m,td(0)}}{T_m} \quad (5)$$

Зависимости изменения отклонений формы, связанные с износом технологической оснастки для закрепления заготовки, запишутся аналогично (4), (5).

По случайным нарушениям точности оборудования и приспособлений при врезном шлифовании с прибором активного контроля в известной литературе нет точных данных. Тем не менее, можно утверждать, что интервалы времени между такими возмущениями распределены по показательному закону, амплитуды отклонений – по закону Рэлея, уравнение (2).

Жесткость технологической системы зависит от большого числа факторов. Величина, обратная жесткости – податливость ω_m определяется как сумма податливости отдельных подсистем: станка, приспособления, заготовки, инструмента.

Податливость заготовки изменяется вследствие съема материала с поверхности. Для деталей типа «тела вращения» на операциях чистового шлифования она не превышает 1...2% и ею можно пренебречь [1, 4, 6, 8]. Податливость абразивного инструмента составляет 2108 м/Н, что значительно меньше податливости других подсистем.

Податливости станка и приспособления для закрепления заготовки изменяются вследствие износа сопряженных поверхностей. Податливость плоского стыка может быть рассчитана по зависимости [10]

$$\omega = K_G R_{\max}^{\nu} \quad (6)$$

где K_G – коэффициент жесткости; ν – параметр кривой опорной поверхности, $R_{\max}$ – максимальная шероховатость поверхности.

Учитывая, что зависимость шероховатости поверхности носит асимптотический характер от времени работы узла трения, уравнение (6) для j -го цикла может быть представлено в виде

$$\omega(t) = \left[\frac{\omega(0)}{R_{\max(0)}} \right]^{\nu} \left[R_{\max(0)} + \Delta R_{\max} (1 - e^{-at}) \right]^{\nu}.$$

где $\Delta R_{\max}$ – максимальное изменение шероховатости за время работы станка; $t = \tau - (j-1)\tau_c$.

Первая производная податливости соответственно определится как

$$\dot{\omega}(t) = \frac{\omega_{(0)} \cdot \Delta R_{\max} \cdot v \cdot a}{[R_{\max(0)}]^b} \times \\ \times [R_{\max(0)} + \Delta R_{\max} (1 - e^{-at})]^{b-1} e^{-at}$$

Оценим влияние жесткости на процесс изменением интенсивности съема материала на этапе выхаживания. Если предположить, что радиальный съем материала Δr зависит от радиальной составляющей силы резания, а сила резания в свою очередь пропорциональна деформациям в технологической системе y_m и жесткости j , то

$$\Delta r = C_r P_y^b = C_r (y_m j)^b,$$

где C_r , b – эмпирические коэффициенты, которые зависят от свойств абразивного инструмента и обрабатываемого материала. При шлифовании конструкционных сталей $b=1,0 \dots 1,2$.

Выразим жесткость технологической системы через податливость. После преобразований получим

$$\Delta r = C_r y_m^b \frac{[R_{\max(0)}]^b}{[\omega_{(0)}]^b} \cdot [R_{\max(0)} + \Delta R_{\max} (1 - e^{-at})]^{-b}$$

Первая производная радиального съема материала определяется выражением

$$\Delta \dot{r} = C_r y_m^b \cdot \frac{[R_{\max(0)}]^b}{[\omega_{(0)}]^b} \cdot (-b) \cdot \Delta R_{\max} \cdot a e^{-at} \times \\ \times [R_{\max(0)} + \Delta R_{\max} (1 - e^{-at})]^{-(b+1)}$$

Абразивный инструмент является одним из наименее устойчивых элементов технологической системы. В процессе работы вследствие износа и правки уменьшается диаметр круга, изменяются геометрия режущих кромок, их число, форма рабочей поверхности инструмента. Зависимость диаметра круга D от времени за период его работы до полного износа может быть записана в виде

$$D_j(t) = D_{j-1} - 2\Delta R_{tdj} - 2 \int_0^t S_{\Delta R} d\tau \quad (7)$$

где ΔR_{tdj} – слой, снимаемый с круга при j -ом цикле правки; $S_{\Delta R}$ – скорость радиального износа круга в момент времени t .

Для станков с ЧПУ сумма второго и третьего слагаемых уравнения (7) для каждого

цикла остаются постоянными, так как алмаз при правке подается на заданную глубину. Это значительно облегчает вычисление текущего диаметра круга. Первая производная изменения диаметра инструмента в процессе шлифования равна скорости его износа.

С уменьшением диаметра круга для большей части моделей станков снижается один из главных режимных параметров – скорость круга, так как частота вращения шпинделя шлифовальной бабки v_k остается постоянной. Это усиливает влияние изменений диаметра на выходные переменные операции шлифования.

Оценить влияние изменения диаметра круга на процесс шлифования можно по изменениям съема материала и шероховатости обработанной поверхности R_a . Для установившегося процесса шлифования [11, 12]

$$\Delta r = \frac{t_f^2}{1,478 \cdot t_f + \frac{13,66 V_u \sqrt{D+d}}{K_c (\pi D v_k \pm V_u) n_g \sqrt{D d \rho_g}}} \quad (8)$$

$$R_a = \frac{0,25 V_u^{0,4} t_f^{0,6} (D+d)^{0,2}}{K_c^{0,4} (\pi D v_k \pm V_u)^{0,4} n_g^{0,4} D^{0,2} d^{0,2} \rho_g^{0,2}} \quad (9)$$

где d и V_u – диаметр и скорость вращения заготовки; K_c – коэффициент стружкообразования; n_g – число зерен на единице рабочей поверхности инструмента; ρ_g – радиус закругления при вершине зерна; t_f – фактическая глубина микрорезания; v_k – частота вращения круга.

Производные скорости съема материала и шероховатости поверхности не вычисляем, так как диаметр круга наиболее значительно уменьшается при правке, т. е. дискретно.

Текущее число режущих кромок на рабочей поверхности вычисляется по формуле [3, 13, 14]

$$n_g(\tau) = \frac{z_g}{P_p} + \left(n_{g0} - \frac{z_g}{P_p} \right) (1 - P_p)^{v_k \tau}, \quad (10)$$

где z_g – число зерен, появляющихся на поверхности круга при одном контакте с заготовкой; P_p – вероятность разрушения и вырывания зерна при контакте.

Наиболее существенно число режущих кромок влияет на скорость съема материала и шероховатость обработанной поверхности.

Для установившегося режима обработки после подстановки значения $n_g(\tau)$ из уравне-

ния (10) в (8) и (9) получаем

$$R_a = \frac{0,25V_u^{0,4}t_f^{0,6}(D+d)^{0,2}}{K_c^{0,4} \cdot (\pi \cdot Dv_k \pm V_u) \cdot (D \cdot d)^{0,2} \rho_g^{0,2} \cdot \left[\frac{z_g}{P_p} + \left(n_{g0} - \frac{z_g}{P_p} \right) \cdot (1 - P_p)^{v_k \tau} \right]}.$$

$$\Delta r = \frac{t_f^2}{1,478t_f + \frac{13,66V_u \sqrt{D+d}}{K_c \cdot (\pi \cdot Dv_k \pm V_u) \cdot \left[\frac{z_g}{P_p} + \left(n_{g0} - \frac{z_g}{P_p} \right) \cdot (1 - P_p)^{v_k \tau} \right] \sqrt{D \cdot d \rho_g}}}.$$

Производные радиального съема материала и шероховатости поверхности определяются дифференцированием полученных зависимостей.

Изменение формы режущих кромок связано с их износом и разрушением. Выполненными исследованиями установлено, что в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, в процессе работы инструмента увеличивается радиус при вершине зерна ρ_3 , в плоскости параллельной на вершине появляется площадка износа. Зависимости для моделирования текущей формы режущих кромок имеют вид [3, 15]

$$\rho_g(\tau) = \frac{\rho_{g(0)} t_f}{t_f - h_g}, \quad l_g = 2 \sqrt{2 \rho_{g(0)} h_g}.$$

где h_g – износ вершины абразивного зерна; l_g – размер площадки износа при вершине зерна.

Форма режущих кромок наиболее значительно влияет на силы резания, съем материала, шероховатость обработанной поверхности.

Для стационарного процесса ($\varphi(t)=l(t)$) h_g пропорционален величине относительного износа h_0 , длине пути резания при одном контакте L_k и времени работы инструмента;

$$h_g = h_0 L_k v_k \tau. \quad (11)$$

$$R(\gamma, \tau) = \bar{R}(\tau) + A_l \cos(l\gamma + \Psi_l) - \int_0^\tau S_l(t) \cos(l\gamma + \Psi_{sl}) dt + \sum_{k=1}^\infty A_k \cos(k\gamma + \Psi_k) - \sum_{k=1}^\infty \int_0^\tau S_k(t) \cos(k\gamma + \Psi_{sk}) dt \quad (12)$$

где $\bar{R}(\tau)$ – среднее значение радиус-вектора в момент времени τ ; A_l , Ψ_l – амплитуда и фаза преобладающей гармоники отклонений (закономерная составляющая); S_l и Ψ_{sl} – ско-

где $0 \leq \tau < T_d$ (T_d – стойкость круга между правками).

Зависимости для расчета Δr и R_a получим, заменив в уравнениях (8) и (9) ρ_g на $\rho(\tau)$ при h_g , из уравнения (11). Производные Δr и R_a соответственно определяются в виде

$$\Delta \dot{r} = \frac{t_f^2 h_0 L_k v_k a_r (t_f - h_0 L_k v_k \tau)^{0,5}}{\left[1,478t_f + a_r (t_f - h_0 L_k v_k \tau)^{0,5} \right]^2}.$$

$$\text{где } a_r = \frac{13,7v_k}{n_g K_c (V_k \pm V_u) \sqrt{D_e \rho_g t_f}}.$$

$$\dot{R}_a = \frac{a_R h_0 v_k L_k}{(t_f - h_0 v_k L_k \tau)^{0,8}}.$$

$$\text{где } a_R = \frac{0,05v_k^{0,4}t_f^{0,4}}{K_c^{0,4}(V_k \pm V_u)^{0,4}n_g^{0,4}D_e^{0,2}\rho_{g(0)}^{0,2}}.$$

где D_e – эквивалентный диаметр; V_k – скорость круга.

Отклонения формы абразивного инструмента в плоскости, перпендикулярной оси его вращения, возникают вследствие вибраций в технологической системе. Они появляются уже при правке. В процессе шлифования отклонения, как правило, увеличиваются. Представим текущий радиус-вектор круга зависимостью

рость и фаза изменения закономерной составляющей; A_k и Ψ_k – амплитуда и фаза случайных отклонений; S_k и Ψ_{sk} – скорость и фаза изменения случайных отклонений.

Если $\Psi_{sl} = \psi_l + \pi$, $\Psi_{sk} = \psi_k + \pi$, S_l и $S_k = \text{const}$, то зависимость (12) принимает вид:

$$R(\gamma, \tau) = \bar{R}(\tau) + (A_l + S_l \tau) \cos(l\gamma + \psi_l) + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k + S_k \tau) \cos(k\gamma + \psi_k).$$

$$\dot{R}(\gamma, \tau) = \bar{R}'(\tau) + S_l \cos(l\gamma + \Psi_l) + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \cos(k\gamma + \Psi_k).$$

Наибольшее влияние отклонения формы инструмента оказывают на волнистость шлифовальной поверхности в плоскости, перпендикулярной оси вращения изделия. Волнистость характеризуется наибольшей высотой W и шагом S_w на длине измерения $L_w > S_w$. Для обработанной поверхности она может быть вычислена по радиус-вектору выступов $r_{led,k}$ и впадин $r_{val,k}$

$$W = \max(r_{led,k} - r_{val,k}) \quad k = 1, 2, 3, 4, 5.$$

Радиус-вектор после j -го контакта поверхности с инструментом определяется как $r_j = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha)$.

Случайные отклонения в изменении числа, распределения режущих кромок на рабочей поверхности инструмента не зафиксированы; случайные отклонения в профиле инструмента учтены в уравнении (12). Отклонения в частотах вращения инструмента и заготовки, связанные с изменением напряжения и частоты тока, имеют особенности для каждого конкретного предприятия и могут быть идентифицированы с белым шумом.

Заготовка, как преобразуемый объект, определяется исходным состоянием $z(0)$ и состоянием в процессе обработки $z(\tau)$. Все параметры могут иметь как закономерные, так и случайные компоненты отклонений. Так, например, вся партия заготовок может иметь увеличенный или уменьшенный припуск на шлифование; у всей партии заготовок может наблюдаться биение поверхности относительно оси вращения.

Рассмотрим влияние каждого из параметров исходного состояния заготовки на выходные параметры операции врезного шлифования. Колебания припуска Π как закономерные, так и случайные при шлифовании с прибором активного контроля влияют на продолжительность чернового этапа,

время выполнения которого T_z может быть определено по зависимости

$$T_z = \frac{\Pi}{\Delta r \nu_u},$$

где ν_u – частота вращения заготовки.

Колебания твердости заготовки не оказывают существенного влияния на выходные параметры процесса, так как по теоретическим и практическим данным сила резания, производительность процесса, скорость износа инструмента определяются физико-механическими свойствами материала в зоне контакта, температура которого, как правило, выше температуры структурных изменений.

Из пространственных отклонений при обработке деталей тел вращения наиболее существенным является биение поверхности (ее эксцентриситет относительно оси вращения).

Появление эксцентриситета у заготовки всегда приводит к появлению остаточного эксцентриситета на обработанной поверхности. Процесс изменения эксцентриситета описывается уравнением

$$\varepsilon(\tau) = \varepsilon_{(0)}(1 - E)^{\tau}.$$

где $\varepsilon(\tau)$ – остаточный эксцентриситет в момент времени τ ; ε_0 – эксцентриситет заготовки.

Коэффициент E вычисляется с учетом жесткости технологической системы J , глубины резания t и радиальной составляющей силы резания P_y по зависимости (13), а первая производная эксцентриситета определяется выражением (14).

$$E = \frac{J}{J + \frac{P_y}{t}}, \quad (13)$$

$$\dot{\varepsilon}(\tau) = \varepsilon_{(0)} \nu_u (1 - E)^{\nu_u \tau} \ln(1 - E). \quad (14)$$

Заключение

Рассмотренные зависимости выходных переменных от параметров технологической системы позволяют провести оценку степени влияния изменений параметров состояния технологической системы на выходные переменные операции шлифования и установить минимальные интервалы времени проведения коррекций управляющей программы.

Список литературы

1. W. Brian Rowe. Principles of modern grinding technology. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK 2009. – 421 p.
2. Ардашев Д.В. Проектирование операций шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев, В.И. Гузев // Известия ВолГТУ. 2017. № 9. – С. 98–102.
3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: моногр. – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
4. Hassan Abdel-Gawad El-Hofy. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. CRC Press, 2006. – 562 p.
5. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press, New York, 2008. – 372 p.
6. Полянчиков Ю.Н. Анализ и оптимизация операции шлифования: моногр./ Ю.Н. Полянчиков, А.Н. Воронцова, Н.А. Чернышев, В.В. Воронцов. – Волгоград: Политехник. 2003. – 268 с.
7. Robert I. King, Robert S. Hahn. Handbook of Modern Grinding Technology. Springer Science & Business Media, 2012 г. – 360 p.
8. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. Резникова А.Н. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
9. Handbook of Machining with Grinding Wheels/ Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner, Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe, Ichiro Inasaki. CRC Press, 2006. – 632 p.
10. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов В.П. Федоров. – М: Машиностроение, 1979. – 167 с.
11. Novoselov Y. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear/ Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // Procedia Engineering 2. «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016», 2016. – P. 809-814.
12. Novoselov Y. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact area/ Y.

Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // Procedia Engineering. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017», 2017. – С. 991-996.

13. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке/ А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 160 с.
14. Братан С.М. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования/ С.М. Братан, В.Б., Богущкий, Ю.К. Новоселов, С.И. Рощупкин //Научные технологии в машиностроении. 2017. № 5 (71). С. 9-18.
15. Novoselov Y. Forecasting the surface roughness of the workpiece in the round external grinding/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017», 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901080.

References

1. W. Brian Rowe. Principles of modern grinding technology. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK 2009. – 421 p.
2. Ardashev D.V. Proektirovanie operacij shlifovaniya na osnove prognozirovaniya rabotosposobnosti shlifoval'nyh krugov / D.V. Ardashev, V.I. Guzev // Izvestiya VolGTU. 2017. № 9. – S. 98–102.
3. Novoselov Y.K. Dinamika formo-obrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke: monogr. – Sevastopol': Iz-vo SevNTU, 2012. – 304 p.
4. Hassan Abdel-Gawad El-Hofy. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. CRC Press, 2006. – 562 p.
5. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press, New York, 2008. – 372 p.
6. Polyanchikov YU.N. Analiz i optimizaciya operacii shlifovaniya: monogr./ YU.N. Polyanchikov, A.N. Voroncova, N.A. Chernyshev, V.V. Voroncov. – Volgograd: Politehnik. 2003. – 268 p.
7. Robert I. King, Robert S. Hahn. Handbook of Modern Grinding Technology. Springer Science & Business Media, 2012 г. – 360 p.
8. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik / Pod red. Reznikova A.N. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 391 p.
9. Handbook of Machining with Grinding Wheels/ Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner, Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe, Ichiro Inasaki. CRC Press, 2006. – 632 p.
10. Ryzhov E.V. Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnyh svoystv detalej mashin / E.V. Ryzhov, A.G. Suslov V.P. Fedorov. – M: Mashinostroenie, 1979. – 167 s.
11. Novoselov Y. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear/ Y. Novoselov,

-
- S. Bratan, V. Bogutsky // *Procedia Engineering* 2. «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016», 2016. – P. 809-814.
12. Novoselov Y. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact area/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // *Procedia Engineering*. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017», 2017. – С. 991-996.
13. Korolev A.V. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoj obrabotki CH. 2. Vzaimodejstvie instrumenta i zagotovki pri abrazivnoj obrabotke/ A.V. Korolev, YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. – 160 p.
14. Bratan S.M. Modelirovanie processa stohasticheskogo vzaimodejstviya instrumenta i zagotovki na operaciyah shlifovaniya/ S.M. Bratan, V.B., Boguckij, YU.K. Novoselov, S.I. Roshchupkin // *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2017. № 5 (71). P. 9-18.
15. Novoselov Y. Forecasting the surface roughness of the workpiece in the round external grinding/ Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron, A. Kharchenko // *MATEC Web of Conferences* «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017», 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901080.
-

УДК 621.923:621.90.17

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ШЛИФОВАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается операция шлифования как динамическая система. Каждая из ее подсистем имеет свой набор свойств, параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, их поведение представляется в виде функционала, характеризующего состояние технологической системы. При изменении вектора параметров состояния технологической системы алгоритм изменения управляющих воздействий должен корректироваться для каждого j -го цикла работы системы или должны быть стабилизированы параметры технологической системы и алгоритм управления в наиболее благоприятной области. Схема оптимального управления включает процедуру оценки состояния технологической системы до обработки, оценки состояния ее в процессе обработки, восстановления состояния технологической системы и этап стабилизации номинального цикла шлифования. Представлена концептуальная схема оптимального управления операцией шлифования.

Ключевые слова: операция шлифования, технологическая система, динамическая система, схема связей между подсистемами, схема оптимального управления, критерий эффективности.

CONTROL OPERATION STRATEGY OF GRINDING IN AUTOMATED MANUFACTURING

A.O. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹¹FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article discusses the grinding operation as a dynamic system. Each of its subsystems has its own set of properties, state parameters, development history, vector of input and output variables, their behavior is represented as a functional characterizing the state of the technological system. When the vector of state parameters of a technological system changes, the algorithm for changing control actions should be corrected for each j -th cycle of the system operation or the parameters of the technological system and the control algorithm in the most favorable area should be stabilized. The optimal control scheme includes a procedure for assessing the state of the technological system before processing, assessing its state during processing, restoring the state of the technological system, and the stage of stabilizing the nominal grinding cycle. A conceptual diagram of the optimal control of the grinding operation is presented.

Keywords: grinding operation, technological system, dynamic system, diagram of connections between subsystems, optimal control scheme, efficiency criterion.

Повышение эффективности операции шлифования возможно за счет оптимального управления процессом обработки на автоматическом оборудовании. Методика построения оптимального управления требует наличия математической модели, которая позволяла бы с достаточной точностью описывать поведение технологической системы в реальном масштабе времени [1].

На процесс шлифования оказывает влияние большое количество изменяю-

щихся входных, управляющих и возмущающих воздействий. Поэтому для построения математической модели необходимо провести оценку технологического процесса как системы.

Операция шлифования, являясь частью технологического процесса, включает совокупность элементарных целенаправленных действий, связанных между собой структурно [2, 3].

Операция может быть разделена по функциональным признакам на подси-

фиксированного момента времени t в пространстве переменных $u^1, u^2, \dots, u^r$ задается некоторое непустое множество

$U_i(y(t-1))$, которое определяет допустимую область управления, пределы изменения управляющих воздействий:

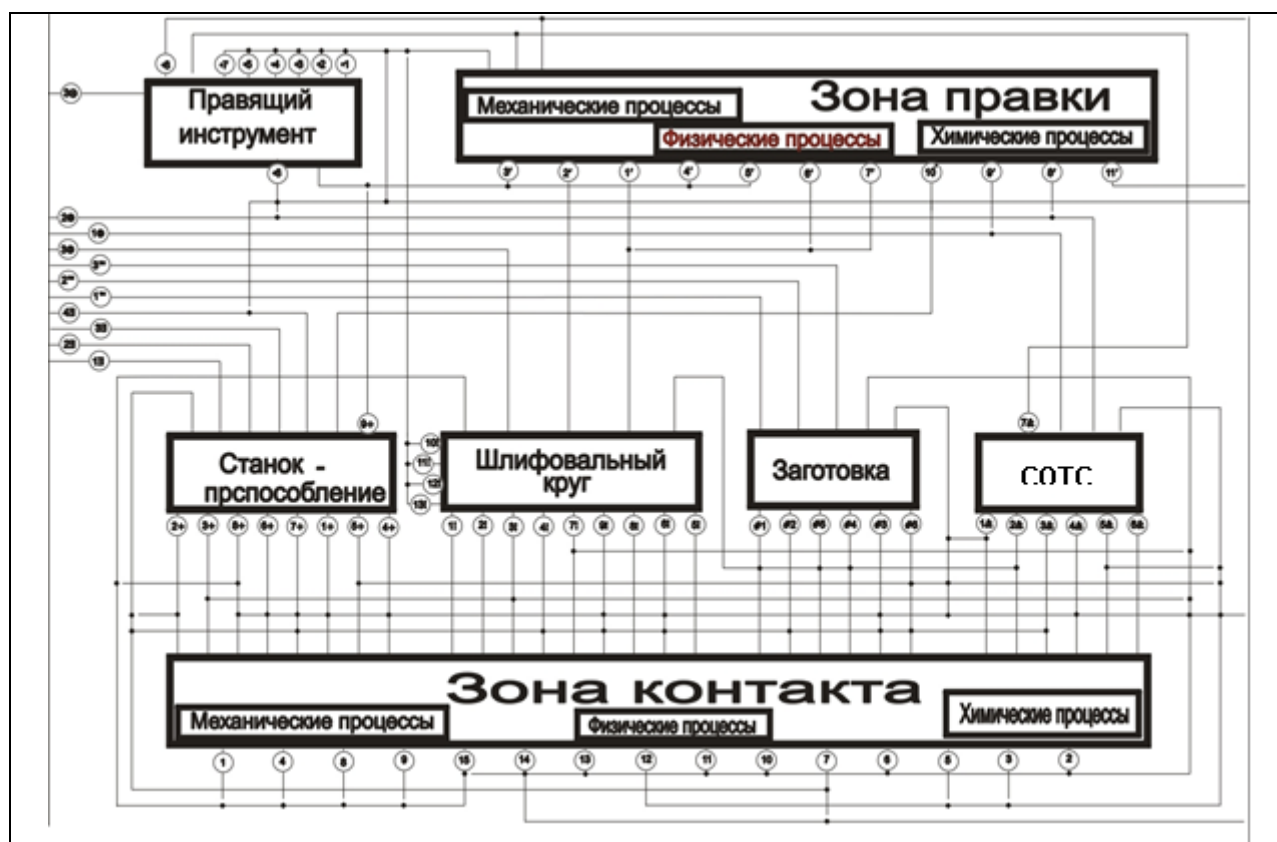
$$u_i(t) \in U_i[y(t-1)] \quad (6)$$


Рис. 1. Схема связей между подсистемами операции шлифования

При управлении технологическими процессами абразивной обработки согласно состоянию (5) определяется набор величин, характеризующих вектор параметра состояния системы, например, при обработке изделий по схеме круглого наружного шлифования [7-9].

Их можно разделить на физические параметры (твердость, скорость движения элементов резания, загрязненность СОТС, силовые характеристики) и на геометрические показатели:

$$\begin{aligned} h_{дi} &= \Phi^1(h_{дi-1}, u_i, w_i, x_i); \\ R_{ai} &= \Phi^2(R_{ai-1}, u_i, w_i, x_i); \\ R_{MAXi} &= \Phi^3(R_{MAXi-1}, u_i, w_i, x_i); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi^3(R_{MAXi-1}, u_i, w_i, x_i); \\ D_{крj} &= \Phi^3(D_{крj-1}, u_j, w_j, x_j); \\ H_{детi} &= \Phi^3(H_{детi-1}, u_i, w_i, x_i); \\ \Pi_i &= \Phi^3(\Pi_{i-1}, u_i, w_i, x_i), \end{aligned} \quad (7)$$

где $h_{дi}$ – глубина дефектного слоя на i -м обороте; R_{ai} – величина шероховатости R_a на i -м обороте; R_{maxi} – величина шероховатости R_{max} на i -м обороте; $D_{крj}$ – диаметр круга на j -м обороте; $H_{детi}$ – высота детали; Π_i – высота припуска, оставшегося к i -му обороту; $d_{свj}$ – глубина профиля круга на j -м обороте.

Вектор параметров состояния $Z_{i(j)}$ для обеспечения качества изделий должен находиться в некоторой допустимой области: $Z_{i(j)} \leq Z_{кри(j)}$.

Критическое значение вектора $Z_{кри(j)}$ на любом обороте (проходе) определяют

ограничения, которые состоят из технических требований к детали и инструменту, условиями протекания обработки и допустимыми режимами работы оборудования.

$$Z_{kpi(j)} = F[S_{i(j)}, Z_{don}, u_{don}^n] \quad (8)$$

Для характеристики критического значения вектора $Z_{kpi(j)}$ при круглом наружном шлифовании могут быть использованы, например, следующие ограничения:

$$\begin{aligned} h_{\partial i} &\leq h_{\partial don} + \Pi_i; \\ R_{a i} &\leq R_{a don} + \Pi_i; \\ R_{max i} &\leq R_{max don} + \Pi_i; \\ 0 &\leq u^n \leq u_{don}^n. \end{aligned} \quad (9)$$

где $t_{\phi i}$ – фактическая глубина резания на проходе; u_{don}^n – максимально допустимые значения управляющих воздействий, генерируемых оборудованием.

Критерием эффективности при шлифовании абразивными кругами обычно принимают штучное время или приведенные затраты на шлифование изделия [3, 10, 11].

В общем случае, критерий эффективности J может быть выражен в виде функционала [2]:

$$\begin{aligned} J &= f_1^0(y_0, u_1(t)) + f_2^0(y_1, u_2(t)) + \\ &+ \dots + f_n^0(y_{n-1}, u_n(t)) + G_J = \quad, \quad (10) \\ &= \sum_{n=1}^n f_n^0(y_{i-1}, u_i(t)) + G_J \end{aligned}$$

где f_i^0 – функция критерия эффективности на i -ой операции; G_J – постоянные расходы, не зависящие от условий выполнения операции.

В целом задача оптимизации технологического процесса шлифования может быть сформулирована следующим образом: зная начальное Y_0 и конечное Y_H состояния, выбрать такое допустимое управление U типа (6), которое придает функционалу (10) минимальное значение. Данная постановка является задачей теории оптимального управления. Для её решения необходимо определить функционалы (5), (6) и (10) в виде зависимостей от технологических факторов, определяющих процесс формообразования поверхности при шлифовании.

Из известных систем автоматическо-

го управления при обработке изделий на операциях шлифования используются: разомкнутые системы; системы с обратной связью; адаптивные системы. По первой схеме работает 70% оборудования. При этом считается, что в процессе обработки каждой отдельной детали все параметры технологического процесса неизменны и управление осуществляется по жестким циклам (номинальным траекториям в пространстве состояний технологической системы). Однако в этом случае не учитывается влияние возмущающих факторов, которые трансформируют связи между параметрами технологической системы, в результате чего система отрабатывает алгоритм управления с существенными погрешностями.

По второй схеме работают порядка 28...29% шлифовальных станков, при этом, как правило, контролируется один из параметров технологической системы или одна из выходных переменных. Наиболее часто такими параметрами или переменными выбирается размер обрабатываемой поверхности, одна из составляющих сил резания и т.д. При применении таких систем стремятся компенсировать влияние возмущающих воздействий, стабилизируя систему относительно номинальной траектории. Однако существующие системы управления не позволяют проводить обработку изделий по оптимальным траекториям, так как осуществляют формирование управляющего сигнала по неполным данным с шумами измерений. Устранение этого недостатка возможно за счет оптимального оценивания состояния технологической системы, на основе которого может быть сформировано управление. В этом случае, необходимо аналитическое представление функционалов, характеризующих отклонения состояния технологической системы, т.е. сами отклонения должны быть представлены конкретными математическими выражениями.

Таким образом, при изменении вектора параметров состояния технологической системы могут изменяться численные значения выходных переменных, а в общем случае может измениться опера-

тор, отражающий закон преобразования параметров объекта. Это означает, что алгоритм изменения управляющих воздействий должен корректироваться для каждого j -го цикла работы системы или должны быть стабилизированы параметры технологической системы и алгоритм управления в наиболее благоприятной области.

Реализация такого управления возможна за счет применения систем с обратной связью, внедрение которых сдерживается отсутствием стратегии оптимального управления операцией, предусматривающей непрерывную оценку состояния системы, с использованием ме-

тодов теории оценивания и фильтрации при управлении объектами, которые до настоящего времени не применялись в теории шлифования. При этом возможно несколько вариантов: состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы можно пренебречь; состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя; состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы можно пренебречь; состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя.

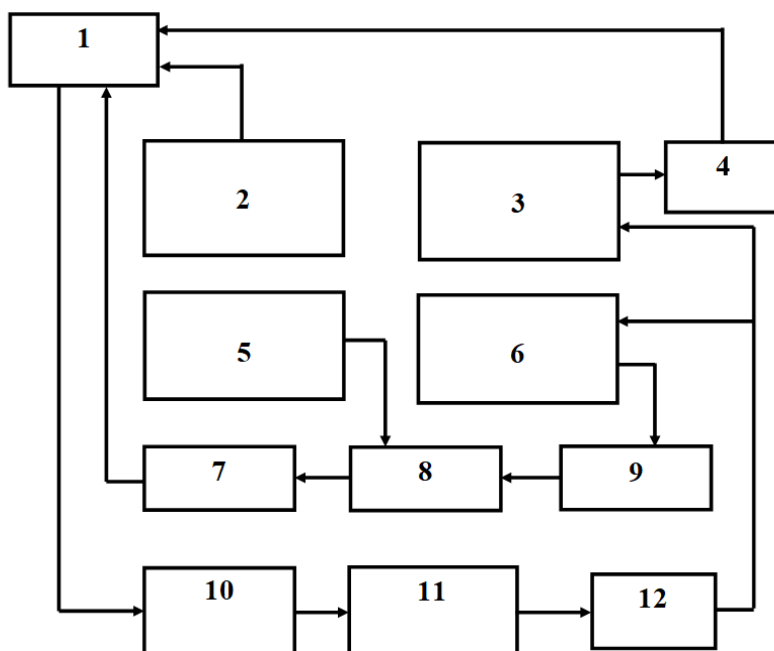


Рис. 2. Концептуальная схема оптимального управления операцией шлифования: 1 – расчет циклов управления операцией; 2 – состояние ТС известно, состояниями параметров системы можно пренебречь; 3 – состояние ТС неизвестно, состояниями параметров системы можно пренебречь; 4 – оценка состояния ТС; 5 – состояние ТС известно, состояниями параметров системы пренебречь нельзя; 6 – состояние ТС неизвестно, состояниями параметров системы пренебречь нельзя; 7 – оценка состояния ТС; 8 – восстановление состояния ТС; 9 – оценка состояния ТС; 10 – оценка состояния ТС в процессе шлифования; 11 – управление циклом со стабилизацией заданной траектории; 12 – переход к $(j + 1)$ -му циклу

Для рассматриваемых случаев схема оптимального управления (рис. 2) включает процедуру оценки состояния технологической системы до обработки, оценки состояния технологической системы в процессе обработки, восстановления состояния технологической системы и этап стабилизации номинального цикла шлифования.

Для таких процессов необходимо принимать решения и определять управление в

реальном масштабе времени на основе измерений параметров объекта. В этом случае, управление операцией возможно за счет совместного решения задач оптимального оценивания состояния и регулирования, которые включаются в единый процесс.

При отсутствии вышеуказанных зависимостей в аналитической форме, решение задачи оптимизации технологического процесса возможно путем последовательного

пошагового принятия решений по выбору управлений из состава допустимых, итерационным методом, с оценкой качества результата каждого шага (производства каждой отдельной детали) и пошаговым, целенаправленным изменением параметров процесса для получения деталей с наилучшим качеством [12-14].

Такая схема является схемой адаптивного управления, по ней работают только отдельные единицы шлифовальных станков, что связано с применением сложных алгоритмов обработки информации. Такие системы также не позволяют оптимально обрабатывать все изделия вследствие длительности этапа поиска оптимальных решений, процедура которого соизмерима со временем протекания процесса шлифования.

Таким образом, для операции шлифования появляется три задачи управления оборудованием:

1. Известен критерий эффективности и математические зависимости, описывающие поведение процесса. Задача управления сводится к расчету номинальных траекторий, вдоль которых осуществляется движение объекта.

2. Известен критерий эффективности, есть математические зависимости, описывающие номинальные траектории, есть аналитическое представление функционалов, характеризующих отклонение состояний технологической системы, при этом задача управления сводится к стабилизации поведения объекта около номинальной траектории.

3. Известен критерий эффективности, отсутствует математическое описание процесса, задача управления сводится к пошаговому поиску оптимальных решений.

Список литературы

1. Современная теория систем управления / Под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Наука, 1970. – 512 с.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1979. – 232 с.
3. Королев В.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при аб-

- разивной обработке/ В.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1975. – 192 с.
4. Лурье Б.Я. Классические методы автоматического управления / Б.Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
5. Деруссо П. Пространство состояний в теории управления / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
6. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 228 с.
7. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.
8. Братан С.М. Синтез фильтра Калмана-Бюсси для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, В.Б. Богуцкий, // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. – с. 87-91.
9. Братан С.М. Методика построения динамических соотношений оценки отклонений формы изделия и шлифовального круга/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, / Е.А. Владецкая // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2018. – Вып.1(9). – С.42-46
10. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36-40.
11. Братан С.М. Синтез стохастического наблюдателя Льюнбергера для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2018. – Вып.2(10). – С.9-14.
12. Братан С.М. Обеспечение стабильности параметров качества изделий за счет разработки систем адаптивного управления / С.М. Братан, Ю.О. Стреляная, М.Г. Ступко. – Вестник СевНТУ. Вып. 139: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – С. 22-27.
13. Roshchupkin Stanislav. Method of building dynamic relations, estimating product and grinding circle shape deviations / Stanislav Roshchupkin, Aleksander Kharchenko // MATEC Web Conf. Volume 224, 01001 (2018). International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018).
14. Vladetskaya Ekaterina. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process / Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko,

Dmitriy Vladetskiy // Materials Today: Proceedings 11 (2019) 565–572 Selection and/or Peer-review under responsibility of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Science.

References

1. Sovremennaya teoriya sistem upravleniya (Modern theory of control systems) / Ed. K.T. Leondes. – M.: Nauka, 1970. – 512 s.
2. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke (Dynamics of the formation of surfaces during abrasive processing) / YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta, 1979. – 232 s.
3. Korolev V.A. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke (Study of the processes of formation of the surfaces of the tool and parts during abrasive processing) / V.A. Korolev. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta. 1975. – 192 s.
4. Lur'ye B.YA. Klassicheskiye metody avtomaticheskogo upravleniya (Classical methods of automatic control) / B.YA. Lur'ye, P. Dzh. Enrayt. – SPb.: BKHV-Peterburg, 2004. – 640 s.
5. Derusso P. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya (The state space in control theory) / P. Derusso, R. Roy, CH. Klouz. – M.: Nauka, 1970. – 620 s.
6. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
7. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.
8. Bratan S.M. Sintez fil'tra Kalmana-Byussi dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya / S.M. Bratan, D.Ye. Sidorov, V.B. Bogutskiy, // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii. – Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2015. – S. 87-91.
9. Bratan S.M. Metodika postroyeniya dinamicheskikh sootnosheniy otsenki otkloneniy formy izdeliya i shlifoval'nogo kruga (The method of building dynamic ratios for estimating deviations of the shape of the product and the grinding wheel) / Ye.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, / Ye.A. Vladetskaya // Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol': SevGU, 2018. – Vyp.1(9). – S.42-46.
10. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchej remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriblادobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
11. Bratan S.M. Sintez stokhasticheskogo nablyudatelya L'yunbergera dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya (Synthesis of a stochastic observer Lyunberger to assess the state of the grinding operation) / S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin // Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol': SevGU, 2018. – Vyp.2 (10). – S.9-14.
12. Bratan S.M. Obespecheniye stabil'nosti parametrov kachestva izdeliy za schet razrabotki sistem adaptivnogo upravleniya (Ensuring the stability of product quality parameters through the development of adaptive management systems) / S.M. Bratan, YU.O. Strelyanaya, M.G. Stupko. – Vestnik SevNTU. Vyp. 139: Mashinopriborostroyeniye i transport. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2013. – S. 22-27.
13. Roshchupkin Stanislav. Method of building dynamic relations, estimating product and grinding circle shape deviations / Stanislav Roshchupkin, Aleksander Kharchenko // MATEC Web Conf. Volume 224, 01001 (2018). International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018).
14. Vladetskaya Ekaterina. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process / Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko, Dmitriy Vladetskiy // Materials Today: Proceedings 11 (2019) 565–572 Selection and/or Peer-review under responsibility of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Science.

УДК 621.9

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ

Э.Д. Умеров¹, Д.У. Абдулгазис¹¹ ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет», Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы оптимального управления объектом с учетом влияния случайных возмущений, о которых известны их вероятностные характеристики, получены алгоритмы определения параметров регуляторов. Получена передаточная функция оптимального регулятора с математической моделью объекта управления возмущающего воздействия в виде экспоненциально-косинусной корреляционной функцией и аппроксимированной аperiodическим звеном второго порядка. В случае действия на объект управления возмущающего воздействия в виде «белого шума», оптимальное управление осуществляется пропорционально-дифференциальным законом.

Ключевые слова: сверление, управление объектом, математическая модель, точность обработки, технологическая система.

CONTROL OF DYNAMIC PROCESS SYSTEM DEEP HOLE DRILLING

E.D. Umerov¹, D.U. Abdulgazis¹¹ Crimean engineer-pedagogical University, Simferopol, Russian Federation

Abstract

In the article the questions of optimal control of the object, taking into account the influence of random perturbations, which are known for their probabilistic characteristics are obtained, the algorithms determine the parameters of the reg-type stimulants. The transfer function of the optimal controller with a mathematical model of the control object of the perturbed influence in the form of exponential-cosine correlation function and approximated by the aperiodic link of the second order is obtained. In the case of action on the control object of the perturbed effect in the form of "white noise", the optimal control is carried out in proportion to the differential law.

Keywords: drilling, management, mathematical model, accuracy, precision, technological system.

Повышение эффективности и производительности металлорежущего оборудования с применением систем автоматического управления процесса механообработки, на сегодняшний день требует повышения надежности производственного процесса, качества выпускаемых изделий и повышения технико-экономических показателей. А это в свою очередь требует совершенствования существующей структуры управления параметрами режимов обработки, устройств защиты режущего инструмента и упругих перемещений в технологической системе.

Эффективным методом автоматизации являются системы управления с жестко запрограммированным режимом работы. Но

имеющаяся нестабильность характеристик режущего инструмента, неоднородность обрабатываемого материала, неточность методов расчета и других переменных факторов, приводит к тепловой нагрузке на режущий инструмент и неконтролируемым изменениям силовых параметров процесса резания, что ведет к сокращению его ресурса. Особенно это характерно при обработке глубоких отверстий, связанных с трудностями подачи СОТС в зону резания, малой жесткостью режущего инструмента, плохими условиями стружкоотвода, увеличением температуры в зоне резания, проявляющимся с увеличением глубины резания, неоднородностью обрабатываемого материала и рядом других факторов. Все это ведет к

возникновению дефектов при обработке, сопровождающихся браком изделия, поломке режущего инструмента и снижению производительности.

Поэтому одним из эффективных средств операции сверления является управление его режимами обработки в зависимости от условий протекания процесса. Это возможно за счет применения микроконтроллеров, позволяющих реализовывать сложные законы управления автоматизированным оборудованием и повысить его гибкость.

Обеспечение надежности процесса сверления и увеличения точности обработки возможно за счет применения более точных математических моделей процесса сверления, учитывающих упругие деформации в технологической системе и явления происходящие в зоне обработки, а также разработки оптимальных алгоритмов управления процесса сверления.

Известно, что при производстве сверлильных головок, применяемые для получения глубоких отверстий, устанавливают системы управления [1, 2, 3]. Они позволяют уменьшить накопление стружки в канавках сверла, ведущих к увеличению момента на режущем инструменте и изменению динамики системы.

Увеличение момента резания без его управления ведет к заклиниванию режущего инструмента (сверла) и его поломке. Увеличение осевой силы также ведет к потере устойчивости инструмента, к продольно-поперечному изгибу, изменения направления обрабатываемого отверстия, что в конечном итоге приводит к браку.

При создании систем управления учитывают состояние процесса резания, характеризующие динамику процесса обработки [4, 5].

Цель статьи – показать возможность управления динамической системой процесса глубокого сверления с учетом влияния случайных возмущений, а также разработка алгоритма определения параметров регуляторов.

Процесс глубокого сверления, осуществляемый при управлении по каналу

подачи, может быть описан математической моделью аппроксимированной апериодическим звеном второго порядка

$$G_x(s) = \frac{F_f(s)}{v_f(s)} = \frac{Kx}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (1)$$

где $G(s)$ – передаточная функция; $a_2 = T_1 T_2$; $a_1 = T_1 + T_2$; $a_0 = 1$.

Синтез оптимального регулятора проведем используя экспоненциально-косинусную корреляционную функцию. Тогда спектральная плотность мощности возмущающего воздействия можно записать в виде:

$$S_\varphi(\omega) = D_\varphi \frac{2\alpha}{\pi} \cdot \frac{\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2}{(\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2)^2 - 4\beta^2 \omega^2}. \quad (2)$$

Числитель выражения (2), с учетом перехода к переменной $s = j\omega$, можно представить как

$$\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2 = (b_{s0}s + b_{s1})(-b_{s0}s + b_{s1}). \quad (3)$$

При равенстве степеней s , в выражении (3) получим:

$$b_{s0} = 1, \quad b_{s1} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}. \quad (4)$$

Для спектральной плотности мощности знаменатель выражения (2) представим как:

$$(\alpha^2 + \beta^2)^2 - 2(\alpha^2 + \beta^2)s^2 + s^4 + 4\beta^2 s^2 = (a_{s0}s^2 + a_{s1}s + a_{s2})(a_{s0}s^2 - a_{s1}s + a_{s2}). \quad (5)$$

После приравнивания коэффициентов в правой и левой частях определяются значения коэффициентов a_{s0} , a_{s1} , a_{s2}

$$a_{s0} = 1, \quad a_{s1} = 2\alpha, \quad a_{s2} = \alpha^2 + \beta^2. \quad (6)$$

Выражение для спектральной плотности мощности возмущения после факторизации примет вид:

$$S_\varphi(\omega) = S_1(s)S_1(-s), \quad (7)$$

где

$$S_1(s) = \frac{b_{s0}s + b_{s1}}{a_{s0}s^2 + a_{s1}s + a_{s2}}, \quad (8)$$

$$S_1(-s) = \frac{-b_{s0}s + b_{s1}}{a_{s0}s^2 + a_{s1}s + a_{s2}}. \quad (9)$$

Далее проводится факторизация полинома

$$W(s)W(-s) = A(s)A(-s) + m^2, \quad (10)$$

что позволило записать

$$W(s)W(-s) = (a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0}) (a_{g2}s^2 - a_{g1}s + a_{g0}), \quad (11)$$

при этом значения коэффициентов a_{g2} ,

a_{g1} , a_{g0} определяются из выражений:

$$a_{g2} = a_2; \quad a_{g1} = \sqrt{a_1^2 + 2a_{g0}a_{g2} - 2a_2a_0};$$

$$a_{g0} = \sqrt{m^2 + a_0^2}. \quad (12)$$

Тогда

$$W(s) = (a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0}),$$

$$W(-s) = (a_{g2}s^2 - a_{g1}s + a_{g0}), \quad (13)$$

С учетом соотношений (8) и (13) выражение для вспомогательной функции примет вид:

$$\frac{A(-s)}{W(-s)} S_1(s) = \frac{a_2s^2 - a_1s + a_0}{(a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0})} \cdot \frac{b_{s0}s + b_{s1}}{(a_{s0}s^2 + a_{s1}s + a_{s2})}. \quad (14)$$

С учетом того, что в выражении (14) степень полинома знаменателя выше степени полинома числителя, то при его разложении получим:

$$M_0(s) = 0. \quad (15)$$

Для определения правильной дроби с полюсами в левой полуплоскости $M_+(s)$ и правильной дроби с полюсами в правой полуплоскости $M_-(s)$ выражение для вспомогательной функции можно представить в виде суммы дробей с неопределенными коэффициентами C_1, C_2, C_3, C_4

$$M_+(s) + M_-(s) = \frac{C_1 + C_2s}{(a_{s0}s^2 + a_{s1}s + a_{s2})} \cdot \frac{C_3 + C_4s}{(a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0})}. \quad (16)$$

Приравняв числители выражений (14) и (16) и приведя их к общему знаменателю имеем:

$$(a_2s^2 + a_1s + a_0)(b_{s0}s + b_{s1}) = (a_{s0}s^2 + a_{s1}s + a_{s2}) \cdot (C_3 + C_4s) + (C_1 + C_2s)(a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0}). \quad (17)$$

Аналитические выражения для определения значения коэффициентов C_1 и C_2 представляющих практический интерес, в результате приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях s в соотношении

(16) и решение соответствующей системы уравнений запишем в виде:

$$C_1 = k_1 - \left(\frac{l_1 - \frac{l_2r_1 - l_1r_3}{r_4r_1 - r_2r_3}}{r_1} \right) k_2,$$

$$C_2 = k_3 - \frac{l_2r_1 - l_1r_3}{r_4r_1 - r_2r_3} k_4, \quad (18)$$

$$k_1 = \frac{b_{s1}a_{s0}}{a_{g0}}, \quad k_2 = \frac{a_{s2}}{a_{g0}}, \quad k_3 = \frac{b_{s0}a_2}{a_{g2}}, \quad k_4 = \frac{a_{s0}}{a_{g2}},$$

$$r_1 = a_{s0} - k_2a_{g2}, \quad r_2 = a_{s1} - k_4a_{g1}$$

$$r_3 = k_2a_{g1} - a_{s1}, \quad r_4 = a_{s2} - k_4a_{g0},$$

$$l_1 = -b_{s0}a_1 + a_2b_{s1} + k_1a_{g2} + k_3a_{g1},$$

$$l_2 = b_{s0}a_0 + a_1b_{s1} + k_1a_{g1} + k_3a_{g0}.$$

Имея соотношения (14) и (18), с учетом полученной зависимости для $M_+(s)$, вспомогательную функцию $\Phi(s)$ запишем в виде:

$$\Phi(s) = \frac{C_1 + C_2s}{a_{g2}b_{s0}s^3 + s^2(a_{g2}b_{s1} + a_{g1}b_{s0}) + s^2(a_{g0}b_{s0} + a_{g1}b_{s1}) + a_{g0}b_{s1}} \quad (19)$$

Зависимость для передаточной функции оптимального регулятора может быть представлена в виде:

$$G_r(s) = \frac{b_{r3}s^3 + b_{r2}s^2 + b_{r1}s + b_{r0}}{a_{r1}s + a_{r0}}, \quad (20)$$

где $b_{r3} = a_2C_2 - a_{g2}b_{s0}$,

$$b_{r2} = -a_{g2}b_{s1} - a_{g1}b_{s0} + a_1C_1 + a_2C_2,$$

$$b_{r1} = -a_{g1}b_{s1} - a_{g0}b_{s0} + a_1C_1 + a_0C_2,$$

$$b_{r0} = a_0C_1 - a_{g0}b_{s1}, \quad a_{r1} = C_2, \quad a_{r0} = C_1.$$

Таким образом, в оптимальном регуляторе, управляющее воздействие формируется с использованием выходной координаты системы, а также ее производных с коэффициентами передачи. На рис. 1 показана структурная схема регулятора

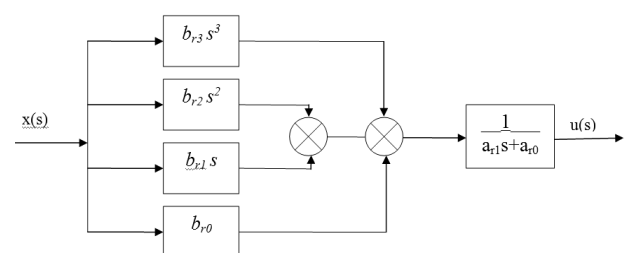


Рис. 1. Структурная схема регулятора

Сумма выходной координаты и ее производных может быть сформирована как управляющее воздействие, преобразованная апериодическим звеном.

Среднеквадратичное отклонение регулируемой координаты может быть определено путем интегрирования ее спектральной плотности по всем частотам

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega. \quad (21)$$

Произведение спектральной плотности возмущающего воздействия на квадрат частотной передаточной функции определяет спектральную плотность выходной координаты:

$$S_x(\omega) = S_\varphi(\omega) |G(j\omega)|^2, \quad (22)$$

откуда

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\varphi(\omega) |G(j\omega)|^2 d\omega. \quad (23)$$

После преобразования выражения (23) получим:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{L(j\omega)}{K(j\omega)K(-j\omega)}, \quad (24)$$

где

$$K(j\omega) = k_0(j\omega)^n + k_1(j\omega)^{n-1} + \dots + k_n, \quad (25)$$

$$L(j\omega) = q_0(j\omega)^{2n-2} + q_1(j\omega)^{2n-4} + \dots + q_{n-1}. \quad (26)$$

В выражении (26) полином $L(j\omega)$ имеет четные степени $j\omega$, а полином $K(j\omega)$ может иметь корни только в верхней полуплоскости.

Интеграл вида (24) может быть рассчитан, используя таблицы в работе в [6]. Тогда передаточная функция замкнутой системы по отношению к возмущающему воздействию запишется как:

$$G_z(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{A_r(s)}{A(s)A_r(s) - B(s)B_r(s)}. \quad (27)$$

Проведя преобразования получим

$$G_z(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{b_{c1}s + b_{c0}}{a_{c3}s^3 + a_{c2}s^2 + a_{c1}s + a_{c0}}, \quad (28)$$

где $a_{c3} = a_2a_{r1} - b_{r3}$, $b_{c1} = a_{r1}$, $b_{c0} = a_{r0}$,

$$a_{c2} = a_1a_{r1} + a_2a_{r0} - b_{r2},$$

$$a_{c1} = a_0a_{r1} + a_1a_{r0} - b_{r1}, \quad a_{c0} = a_0a_{r0} - b_{r0},$$

Переводя квадрат модуля амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы относительно возмущающего воздействия в частотную область получим:

$$|G_z(j\omega)|^2 = \frac{a_{r1}^2\omega^2 + a_{r0}^2}{(a_{c0} - a_{c2}\omega^2)^2 + (a_{c3}\omega^3 - a_{c1}\omega)^2}. \quad (29)$$

В выражении для $S_\varphi(\omega)$ при переходе к переменной $j\omega$, умножая его на квадрат модуля частотной передаточной функции, приведем его к виду (24) и определим средний квадрат с учетом коэффициента передачи объекта B , относящийся к управляющей части системы.

На рис. 2 показана структурная схема замкнутой системы, которая позволяет определить частотную передаточную функцию относительно управляющего воздействия.

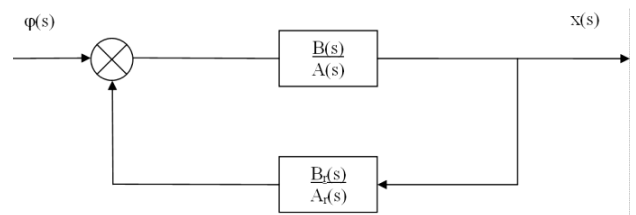


Рис. 2. Преобразованная структурная схема замкнутой системы

С учетом предложенной выше структурной схемы передаточная функция относительно управления примет вид:

$$G_s(s) = \frac{u(s)}{\varphi(s)} = \frac{B_r(s)}{A(s)A_r(s) - B(s)B_r(s)}. \quad (30)$$

При подстановке полиномов в передаточную функцию (30) и перехода квадрата амплитудно-частотной характеристики системы в частотную область относительно управляющего воздействия получим:

$$|G_z(j\omega)|^2 = \frac{(b_{r0} - b_{r2}\omega^2)^2 + (b_{r3}\omega^3 - b_{r1}\omega)^2}{(a_{c0} - a_{c2}\omega^2)^2 + (a_{c3}\omega^3 - a_{c1}\omega)^2}. \quad (31)$$

Затем определяется значение $\langle u^2 \rangle$ путем приведения интеграла к виду (24), изначально умножив выражение (31) на $S_\varphi(j\omega)$.

Для определения ограничений на управляющее воздействие синтезированного регулятора необходимо учесть то, что он работает в линейной зоне, при выполнении следующего условия:

$$u_{\min} < u < u_{\max}. \quad (32)$$

Или же их можно представить как ограничения на модуль управляющего воздействия

$$|u| < u_m. \quad (33)$$

В реальных условиях работы регулятора его алгоритм опишется следующим соотношением:

$$u(t) = \begin{cases} +u_m, & u > u_m \\ u_m, & |u| < u_m \\ -u_m, & u < -u_m \end{cases} \quad (34)$$

То есть фактическая его работа осуществляется в форме нелинейного алгоритма управления, которая отличается от оптимального. Чем меньше времени регулятор находится в зоне насыщения, тем его работа ближе к оптимальному.

Значения $u(t)$ распределяются по закону нормальному распределения в том случае, если происходит линейный закон управления и осуществляется нормальный закон распределения возмущающего воздействия $\varphi(t)$. А промежуток времени, в течение которого происходит ограничение на модуль управляющего воздействия, определяется интегралом Лапласа:

$$\Phi(k_u) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{k_u} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (35)$$

где k_u – коэффициент, определяемый условием:

$$k_u^2 u^2 < u_m^2. \quad (36)$$

В работе [7] приводятся таблицы для определения интеграла Лапласа, где рассмотрим частный случай, когда $\Phi(k_u) = 0,9$ при $k_u = 1,645$. Если принять такое значение

для коэффициента k_u , то это означает, что регулятор 90% времени от общего объема будет работать по линейному алгоритму, а 10% времени будет находиться в зоне насыщения.

При этом, значение коэффициента k_u рекомендуется выбирать в диапазоне от 1,5 до 2,6, согласно анализа влияния времени нахождения регулятора в насыщении на варианты критерия оптимизации [7,8], т.к. время пребывания регулятора в зоне насыщения при данных значениях составляет 5-10%. Это позволяет определить управляющие воздействия и среднеквадратичное отклонение.

Расчеты, проведенные на ПК, по приведенным выше зависимостям, позволили получить значения коэффициентов оптимального регулятора, а также значения управляющего воздействия $\langle u^2 \rangle$ и среднеквадратичного отклонения $\langle x^2 \rangle$ при различных значениях множителя Лагранжа. При этом расчеты выполнялись для различных значений коэффициента B , описывающего относительную жесткость технологической системы. Математическая модель возмущающего воздействия принимает характер экспоненциально-косинусной корреляционной функции.

Как показали расчеты, зависимость отклонения дисперсии от среднеквадратичного управляющего воздействия принимает гиперболический характер. Увеличение коэффициентов усиления регулятора при достижении некоторых значений $\langle u^2 \rangle$ не обуславливает увеличение качества стабилизации. На малых мощностях управления регулятором наблюдается только незначительное изменение показателя среднеквадратичной ошибки стабилизации $\langle x^2 \rangle$ от изменения коэффициента B .

Принятая модель возмущающего воздействия оптимального регулятора, нуждается в образовании производных от регулируемой координаты. Осуществление такого регулятора, представляет собой очень сложную техническую задачу, особенно если он требует перенастройки.

В связи с этим, при использовании оптимального регулятора для достижения требуемых показателей качества в рассматриваемой системе, и принятой модели возмущающего воздействия, необходимо рассматривать как максимально допустимые. Это позволяет оценить свойства более простых систем управления, имеющих регулятор.

При отсутствии достоверной информации о происходящих вероятностных характеристиках возмущения, для синтеза оптимального регулятора можно использовать случайный процесс в виде «белого шума» как модель возмущающего воздействия [9].

Учитывая нормированную спектральную плотность возмущения в виде «белого шума», математическая модель управляемого объекта в виде звена второго порядка примет вид:

$$S_{\varphi}(\omega) = 1. \quad (37)$$

Затем происходит процесс синтеза оптимального регулятора.

После факторизации получим:

$$S_1(\omega) = 1. \quad (38)$$

Используя ранее полученные выражения для $W(s)$ и $W(-s)$ выполним сепарацию (отделение) зависимости (14), после чего получим:

$$\frac{A(-s)}{G(-s)} S_1(s) = \frac{a_2 s^2 - a_1 s + a_0}{a_{g2} s^2 - a_{g1} s + a_{g0}}. \quad (39)$$

В полученном выражении целая часть дроби будет равна единице, поскольку степени полиномов числителя и знаменателя равны.

Так как в левой полуплоскости полином знаменателя не содержит корней, получим:

$$M_+(s) = 0. \quad (40)$$

Следовательно, для вспомогательной функции $\Phi(a)$ выражение примет вид:

$$\Phi(s) = \frac{M_0(s) + M_+(s)}{W(s)S_1(s)} = \frac{1}{W(s)}, \quad (41)$$

а для выражения для передаточной функции оптимального регулятора получим:

$$G_r(s) = A(s) - \frac{1}{\Phi(s)} = b_{r1}s + b_{r0}, \quad (42)$$

где

$$b_{r1} = a_1 - a_{g1}; \quad b_{r0} = a_0 - a_{g0}. \quad (43)$$

С учетом возмущающего воздействия в виде «белого шума» оптимальный регулятор представляется в виде пропорционально-дифференциального регулятора.

Относительно возмущающего воздействия для передаточной функции системы получим:

$$G_z(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{1}{a_{c2}s^2 + a_{c1}s + a_{c0}}, \quad (44)$$

где

$$a_{c2} = a_2, \quad a_{c1} = a_{g1} - b_{r1}, \quad a_{c0} = a_{g0} - b_{r0}, \quad (45)$$

и для системы относительно управляющего воздействия имеем:

$$G_z(s) = \frac{u(s)}{\varphi(s)} = \frac{b_{r1}s + b_{r0}}{a_{c2}s^3 + a_{c1}s^2 + a_{c0}}. \quad (46)$$

Учитывая переход квадрата амплитудно-частотных характеристик в частотную область, относительно возмущающего и управляющего воздействий получим:

$$|G_s(j\omega)|^2 = \frac{(b_{r1}\omega)^2 + b_{r0}^2}{(a_{c0} - a_{c2}\omega^2)^2 + (a_{c1}\omega)^2}, \quad (47)$$

$$|G_z(j\omega)|^2 = \frac{1}{(a_{c0} - a_{c2}\omega^2)^2 + (a_{c1}\omega)^2}. \quad (48)$$

Для системы, имеющей регулятор с передаточной функцией (30) производится расчет среднеквадратичного отклонения и управления с учетом действия на них возмущающих воздействий с корреляционной функцией вида

$$K_{\varphi}(\tau) = D_{\varphi} e^{-\alpha\tau} \cos \beta\tau,$$

где D_{φ} – дисперсия процесса; α – степень затухания корреляционной функции; β – степень колебательности корреляционной функции.

Затем рассчитываются значения $\langle x^2 \rangle$ и $\langle u^2 \rangle$ путем произведения интегралов полученных результатов в приведенных выше выражениях, определения соответствующих коэффициентов, с учетом спектральной плотности возмущающего воздействия, и приведя все это к виду (24).

Полученные данные при использовании в системе пропорционально-дифференциального регулятора и возмущающего воздействия в виде «белого шума» показали незначительное снижение качества управления, с действующей экспоненциально-косинусной корреляционной функцией случайного процесса.

При изменении коэффициента B в диапазоне от 1,0 до 3,0 возрастание среднеквадратичной ошибки стабилизации $\langle x^2 \rangle$ составила не более 3%, по сравнению с оптимальным регулятором (20).

Следовательно, в системе стабилизации возможно использование пропорционально-дифференциального закона регулирования, в связи с незначительным снижением качества управления и простотой его внедрения.

При этом принято допущение, что математическое ожидание параметра отклонения регулируемой координаты при синтезе оптимального регулятора равно нулю. Принятое допущение для рассматриваемой системы может не выполняться. Поэтому необходимо воспользоваться пропорционально – интегрально - дифференциальным законом регулирования и в существующий алгоритм управления добавить интегральную составляющую:

$$G_r(s) = b_{r1}s + b_{r0} + \frac{b_i}{s}. \quad (49)$$

При интегрируемом звене выбор значения коэффициента осуществляется показателем качества управления системой и определяется типом амплитудной частотной характеристики в области значительных частот, т.е. где наблюдаются высокие значения кривой спектральной плотности мощности $S_\varphi(\omega)$. Следовательно, данный коэффициент необходимо выбирать так, чтобы амплитудная частотная характеристика системы деформировалась только в области несущественных частот, при введении в нее интегральной составляющей.

Для определения среднеквадратичного отклонения и управляющего воздействия запишем передаточную функцию регулятора выражением:

$$G_r(s) = \frac{b_{r1}s + b_{r0} + b_i}{s}. \quad (50)$$

Относительно возмущающего воздействия передаточная функция системы примет вид:

$$G_z(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{A_r(s)}{A(s)A_r(s) - B(s)B_r(s)}, \quad (51)$$

и преобразовав, получим:

$$G_z(s) = \frac{s}{a_{c3}s^3 + a_{c2}s^2 + a_{c1}s + a_{c0}}, \quad (52)$$

где $a_{c3} = a_2$, $a_{c2} = a_1 - b_{r1}$, $a_{c1} = a_0 - b_{r0}$, $a_{c0} = b_i$.

Взаимосвязь между переменными $u(s)$ и $\varphi(s)$ в случае замкнутой системы представим в виде:

$$G_z(s) = \frac{u(s)}{\varphi(s)} = \frac{B_r(s)}{A(s)A_r(s) - B(s)B_r(s)}. \quad (53)$$

Подставив выражения необходимых полиномов, получим:

$$G_z(s) = \frac{b_{r1}s^2 + b_{r0}s + b_i}{a_{c3}s^3 + a_{c2}s^2 + a_{c1}s + a_{c0}}. \quad (54)$$

Затем в системе с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором рассчитываются значения $\langle x^2 \rangle$ и $\langle u^2 \rangle$, путем произведения квадрата модуля результатов полученных выражений на функцию $S_\varphi(\omega)$ и приведения к виду (24).

Результаты расчетов показали, что почти на всем диапазоне изменения m^2 среднеквадратичное отклонение составляет не более 4% при введении в систему интегральной составляющей с малым значением коэффициента усиления, принятым значением коэффициента $B = 1,5$ и с учетом возмущающего воздействия на систему с экспоненциально-косинусной корреляционной функцией, качество стабилизации изменяется незначительно.

Следовательно, в данной системе управления, на основе полученных результатов возможно применение пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, обеспечивающего гашение постоянной составляющей возмущающего

воздействия и минимальное значение отклонения регулируемой координаты.

Нами, при оценке качества синтезированной системы не учитывались динамические свойства привода подачи металлорежущего станка, где в основном применяют электропривод постоянного тока, имеющего передаточную функцию вида [6]:

$$G_n(s) = \frac{K_n}{a_{n2}s^2 + a_{n1}s + 1}, \quad (55)$$

где $a_{n2} = T_m T_w$; $a_{n1} = T_m$.

Данное выражение введем в передаточную функцию регулятора, чтобы оценить степень влияния инерционности привода. После чего получим:

$$G_r(s) = \frac{b_{r1}s + b_{r0}}{a_{d2}s^2 + a_{d1}s + a_{d0}}. \quad (56)$$

Относительно управляющего и возмущающего воздействий для замкнутой системы запишем следующие передаточные функции:

$$G_s(s) = \frac{b_{r1}s + b_{r0}}{(a_2s^2 + a_1s + a_0)(a_{n2}s^2 + a_{n1}s + a_{n0}) - (b_{r1}s + b_{r0})}, \quad (57)$$

$$G_z(s) = \frac{a_{n2}s^2 + a_{n1}s + a_{d0}}{(a_2s^2 + a_1s + a_0)(a_{n2}s^2 + a_{n1}s + a_{n0}) - (b_{r1}s + b_{r0})}. \quad (58)$$

Затем проводим расчет среднеквадратичного отклонения системы управления и регулируемой координаты. Как показывают расчеты, при изменении электромагнитной постоянной в интервале $T_w = 0,02 - 0,1$ сек. и электромеханической постоянной времени привода станка в интервале $T_m = 0,05 - 0,2$ сек. происходит увеличение дисперсии отклонения не более 15%.

Также представляет интерес изменение параметров коэффициента B , характеризующего относительную устойчивость системы управления, и спектральной плотности возмущения, на чувствительность показателя качества синтезированной системы.

В качестве основных значений указанных выше коэффициентов были приняты: $\alpha = 0,6$, $\beta = 0,8$, $B = 1$. После чего проводились исследования с вариациями данных коэффициентов.

При изменении параметра α , отражающего спектральную плотность возмущения на качество управления, на 50% от принятого основного значения показало, что наибольшее отклонение среднеквадратичной ошибки стабилизации $\langle x^2 \rangle$ составило не более 2%.

Чувствительность системы при изменении параметра β , отражающую спектральную плотность возмущения, на 50% от принятого основного значения показала, что наибольшее среднеквадратичное отклонение регулируемой величины составила не более 1%.

В случае изменения коэффициента B относительно основного значения на 50% показало, что наибольшее среднеквадратичное отклонение стабилизируемой координаты на всем диапазоне составило не более 1,8%.

Таким образом, получена передаточная функция оптимального регулятора с математической моделью объекта управления возмущающегося воздействия в виде экспоненциально-косинусной корреляционной функцией аппроксимированной апериодическим звеном второго порядка. Установлено, что для управления объектом принятым оптимальным регулятором, необходима информация о производных от регулируемой координаты.

В большинстве случаев, на металлорежущем оборудовании процесс измерения регулируемых параметров осуществляется косвенными методами. Для реализации оптимального регулятора с целью достижения требуемых показателей качества, представляет собой очень сложную техническую задачу, особенно если он требует перенастройки. При использовании оптимального регулятора для достижения требуемых показателей качества в рассматриваемой системе, рассматривались как максимально допустимые, позволяющие оценить свойства более простых систем управления, имеющих регулятор.

В случае действия на объект управления возмущающего воздействия в виде «белого шума», оптимальное управление осу-

ществляется пропорционально-дифференциальным законом. Также структура регулятора может быть дополнена интегрирующим звеном, для компенсации постоянных возмущающего воздействия.

Применение в системе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора с действием на него возмущающего воздействия с экспоненциально-косинусной корреляционной функцией на качество стабилизации показал, что среднеквадратичное отклонение составляет не более 8%.

Синтезированная система автоматического управления динамикой процесса сверления позволяет уменьшить среднеквадратичное отклонение стабилизируемой величины от 10 до 15 раз. Кроме того, система обладает малой чувствительностью к изменениям коэффициентов спектральной плотности возмущения и параметров объекта управления.

Список литературы

1. Заковоротный В.Л. Оптимизация вспомогательных перемещений пиноли силовой головки для сверления глубоких отверстий малого диаметра по критерию максимальной производительности / В.Л. Заковоротный, П.Н. Потапенко, М.Б. Флек // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. Ростов н/Д: 2003. – № 1. – С. 57 – 65.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. М.: 1982. – 208 с.
3. Заковоротный В.Л. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра / В.Л. Заковоротный, Е. Санкар, Е.В. Бордачев // СТИН. 1994. – № 12. – С. 22 – 28.
4. Заковоротный В.Л. Динамический мониторинг состояния процесса резания / В.Л. Заковоротный, Е.В. Бордачев, М.И. Алексейчик // СТИН. 1998. – № 12. – С. 6 – 11.
5. Заковоротный В.Л. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки / В.Л. Заковоротный, И.В. Ладник // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. – № 4. С. 75 – 79.
6. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М: Наука, 1975. – 768 с.
7. Петров Ю.П. Синтез оптимальных систем управления при не полностью известных воз-

мущающих силах / Ю.П. Петров. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 292 с.

8. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1977. – 304 с.
9. Агейкин Д.И. Датчики контроля и регулирования / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.И. Кузнецова. – М.: Машиностроение, 1965. – 193 с.

References

1. Zakovorotny V.L., Potapenko P.N., Fleck M.B. Optimization of the auxiliary movements of the quill power heads for deep hole drilling of small diameter according to the criterion of maximum productivity. Optimizatsiia vspomoga-tel'nykh peremeshchenii pinoli silovoi golovki dlia sverleniia glubokikh otverstii malogo diametra po kriteriiu maksimal'noi proizvoditel'nosti. Vestn. Don state tech. UN-TA. Rostov n/A: 2003. – № 1. – P. 57 – 65.
2. Tverskoy M.M. Automatic control of modes of processing of details on machine. Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami obrabotki detalei na stankakh. M.: 1982. – 208 p.
3. Zakovorotny V.L., Sankar E., Bordachev E.V. Optimal control System by the process of deep hole drilling of small diameter. Sistema optimal'nogo upravleniia protsessom glubokogo sverleniia otverstii malogo diametra. STIN. 1994. – № 12. – P. 22 – 28.
4. Zakovorotny V.L., Bordachev E.V., Alekseychik M.I. Dynamic monitoring of the state of the cutting process. Dinamicheskii monitoring sostoianiia protsessa rezaniia. STIN. 1998. – № 12. – P. 6 – 11.
5. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V. Building information model of a dynamic system metallerie-present machine for the diagnosis process, treatment. Postroenie informatsionnoi modeli dinamicheskoi sistemy metallorezhushchego stanka dlia diagnostiki protsessa obrabotki. Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 1991. – № 4. P. 75 – 79.
6. Besekersky V.A. Popov E.P. Theory of automatic control systems. Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia – M: Science, 1975. – 768 p.
7. Petrov Yu.P. Synthesis of optimal control systems at not fully known exciting forces. Sintez optimal'nykh sistem upravleniia pri ne polnost'iu izvestnykh vozmushchaiushchikh silakh. – L.: Publishing house lenigr. University press, 1987. – 292 p.
8. Petrov Yu.P. Variational methods of optimal control theory. Variatsionnye metody teorii optimal'nogo upravleniia, L.: Energy, 1977. – 304 p.
9. Ageikin D.I. Kostina E.N., Kuznetsova N.I. Sensors of control and regulation. Datchiki kontrolia i regulirovaniia, Moscow: Mechanical Engineering, 1965. – 193 p.

УДК 538.911

ПОСТОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н.С. Пушилина¹, В.Н. Кудияров¹, М.С. Сыртанов¹¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г.Томск, Российская Федерация

Аннотация

Проведены исследования влияния термообработки на структурно-фазовое состояние, микроструктуру, механические свойства и поглощение водорода сплавом Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, изготовленным методом электронно-лучевого сплавления. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа термообработка способствует снижению внутренних напряжений в образцах титанового сплава. Происходит уменьшение коэффициента износа сплава Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si по сравнению с образцами титанового сплава без постобработки. Установлено, что проведение постобработки образцов титанового сплава, изготовленных электронно-лучевым сплавлением, приводит к уменьшению скорости поглощения водорода при высокотемпературном наводороживании из газовой среды при давлении водорода 1 атм.

Ключевые слова: аддитивные технологии, титановые сплавы, термообработка, электронно-лучевое сплавление.

TREATMENT OF TITANIUM ALLOYS, MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

N.S. Pushilina¹, V.N. Kudiirov¹, M.S. Syrtanov¹¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Abstract

The effects of heat treatment on the mechanical properties and hydrogen sorption by the Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy produced by the electron beam melting have been studied in this work. It has been established that the post-processing of titanium alloy manufactured by electron beam melting leads to a decrease in the rate of hydrogen sorption during high-temperature gas-phase hydrogenation. Heat treatment reduces the internal stress and the wear coefficient of the Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy compared to material without post-processing.

Keywords: additive technologies, titanium alloys, heat treatment, electron beam melting.

В последнее время в производстве функциональных деталей из металлических материалов активно внедряются аддитивные технологии [1, 2]. На сегодняшний день такие технологии различаются друг от друга, как выбором материалов, так и способом их послойного нанесения. Аддитивные технологии, в частности метод электронно-лучевого сплавления, являются перспективным направлением для получения металлических изделий со сложной геометрической формой и особенно привлекательны для авиационной промышленности, в которой широко распространено применение титановых сплавов. Использование аддитивных

технологий позволяет ускорить процесс производства изделия, сэкономить металл, изготовить более легкие конструкции со сложной геометрией, которые невозможно изготовить традиционными методами [1-3]. Наиболее широко был изучен сплав Ti-6Al-4V, обладающий уникальными химическими и механическими свойствами [4-6]. Исследования в области аддитивных технологий направлены, во-первых, на изучение влияния технологических характеристик порошков на свойства получаемых изделий [7]. Во-вторых, исследования направлены на установление закономерностей влияния параметров процесса аддитивного производства на структуру и свойства конечных

изделий [8 – 10]. В последнее время активно развивается направление исследований, связанное с разработкой методов и подходов к дополнительной обработке металлических изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий [11-12]. Одним из перспективных направлений таких исследований является проведение дополнительной термической обработки материалов [11, 13].

Целью статьи является – исследование влияния термической обработки на физико-механические свойства сплава Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, изготовленного методом электронно-лучевого сплавления.

Для исследований были изготовлены образцы методом электронно-лучевого сплавления порошка Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si (рис. 1).

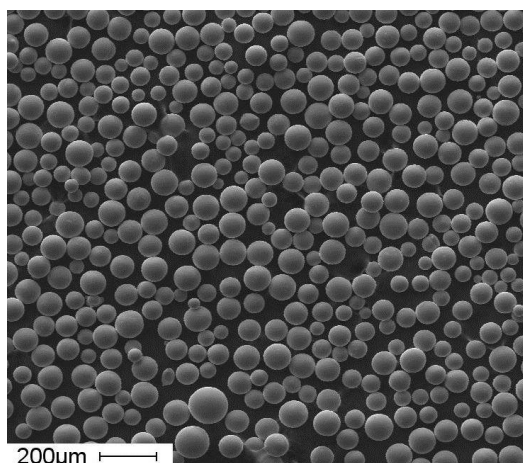


Рис. 1. Изображение порошка Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si по данным сканирующей электронной микроскопии

Изготовление образцов проводилось на установке, разработанной и сконструированной в НИ ТПУ. Параметры эксперимента были следующие: ускоряющее напряжение 40 кВ, ток сплавления 15 мА. Часть образцов подвергалась термической обработке по следующей схеме: нагрев до температуры 900 °С и выдержка, далее охлаждение до 600 °С и выдержка 320 минут, далее охлаждение до комнатной температуры. микроструктура образцов исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии. Структурно-фазовое состояние исследовалось методом рентгеноструктурного анализа. Проведено измерение твердости

экспериментальных образцов на приборе KB30S по методу Виккерса, при нагрузках до 0,5 Н. Проведено измерение износостойкости, коэффициента трения титановых сплавов Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, полученных с применением электронно-лучевого сплавления, на приборе «High Temperature Tribometer». Параметры измерений износостойкости: количество оборотов – 2000, индентор – карбит вольфрама, прикладываемая сила – 2 Н. Площадь треков износа измерялось бесконтактным оптическим профилометром STIL Micromeasure 3D.

Анализ структурно-фазового состояния образцов ЭЛС Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si методом рентгеноструктурного анализа (РСА) показал, что во всех образцах наблюдаются фазы α титана с гексагональной плотноупакованной кристаллической структурой и β титана с объемноцентрированной кристаллической модификацией (Таблица 1). Результаты РСА показали снижение напряжений в β фазе титана после термической обработки.

Таблица 1. Затраты на правку при круглом наружном шлифовании

Сerie	Фазы	Содержание фаз, объем. %	Параметры решетки	$\frac{\Delta d}{d}$, 10^{-3}
1	α -Ti	88.1	a=2.9316 c=4.6763	1.9
	β -Ti	11.9	a=3.2349	2.8
2	α -Ti	92.9	a=2.9298 c=4.6850	0.22
	β -Ti	7.1	a=3.2315	2.8

Микроструктура образцов характеризуется внутрезерненным пластинчатым строением. Размеры (толщина) альфа-пластин в образцах в исходном состоянии составили 0,5 мкм, после термообработки – 0,8 мкм. Образование микроструктуры связано со скоростью охлаждения расплава во время изготовления образцов.

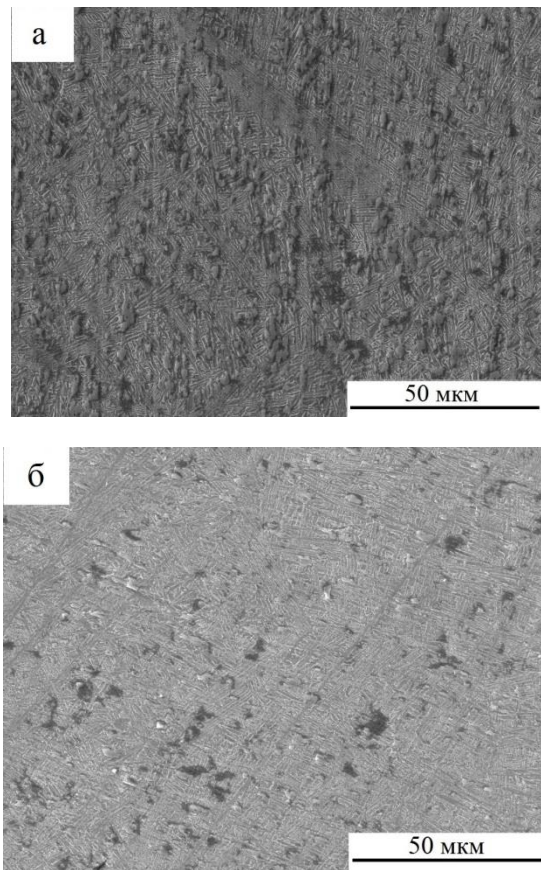


Рис. 2. Микроструктура образцов Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si по данным сканирующей электронной микроскопии до (а) и после (б) термообработки

Известно, что скорость охлаждения влияет на микроструктуру титановых сплавов при термической обработке [14]. Изменение скорости охлаждения регулирует не только дисперсию вторичных α -фазных пластин, но и конечный фазовый состав титановых сплавов. При медленном охлаждении вторичная α -фаза предпочтительно осаждается в пластинах первичной α -фазы. При более высоких скоростях охлаждения α -фаза может осаждаться на границе β -фазы в виде пластин, размер которых уменьшается с увеличением скорости охлаждения.

Термообработка оказывает незначительное влияние на коэффициент износа экспериментальных образцов. Так, до обработки коэффициент износа титанового сплава составил $0,61 \times 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Нм}$, после термообработки – $0,55 \times 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Нм}$. Твердость образцов до обработки составила $421 \pm 10 \text{ Hv0,5}$, после термообработки – $404 \pm 14 \text{ Hv0,5}$.

Известно, что одним из существенных факторов, ограничивающих ресурс работы металлических изделий и конструкций, является водород. Проникая в металлы в ходе плавки, разливки, при электрохимических процессах, при эксплуатации в агрессивных средах, водород является одной из причин проявления дефектов, трещин, ухудшения пластических свойств металлов (водородная хрупкость), приводящих к разрушению изделий. Водородное охрупчивание является серьезной проблемой для изделий из титановых сплавов, поскольку они используются в агрессивных средах и в процессе эксплуатации подвергаются наводороживанию [15, 16]. В данной работе проводился расчет скорости поглощения водорода образцами титанового сплава при насыщении из газовой среды при повышенных температурах. Установлено, что термообработка образцов, изготовленных ЭЛС, позволяет снизить скорость поглощения водорода материалом. Скорость сорбции водорода исходными образцами составила $1,4 \times 10^{-3} \text{ масс.}\%/\text{сек}$, после термообработки $0,5 \times 10^{-3} \text{ масс.}\%/\text{сек}$. Различие в скорости поглощения водорода образцами обусловлены несколькими причинами. Во-первых, содержание бета фазы в образцах. Известно, что скорость диффузии водорода варьируется в разных фазах (то есть α и β титана). Во-вторых, скорость поглощения водорода определяется также микроструктурой образцов, наибольшей скоростью сорбции обладают образцы, характеризующиеся более измельченной микроструктурой. В ряде работ отмечается, что разветвленная граничная структура (высокая плотность границ зерен) способствует повышению скорости сорбции и диффузии водорода [17, 18].

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что дополнительная термическая обработка титанового сплава Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, изготовленного электронно-лучевым сплавлением, позволяет уменьшить внутренние напряжения в материале, снизить коэффициент износа и скорость поглощения водорода при газофазном насыщении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20100).

Список литературы

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 2015, V. 5, pp. 40-53.
2. (Sam) Froes F.H. Additive manufacturing of titanium components: An up-date. *Metal Powder Report*, 2018, 73 (6), pp. 329-337.
3. Dutta B., Froes F.H. The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report*, 2017, 72 (2), pp. 96-106.
4. Jones R., Raman Singh R.K., Iliopoulos A.P., Michopoulos J.G., Phan N., Peng D. Additively manufactured Ti-6Al-4V replacement parts for military aircraft, *International Journal of Fatigue*, 2019, V. 124, pp. 227-235.
5. Pushilina N.S., Syrtanov M.S., Kashkarov E.B., Murashkina T.L., Kudiiarov V.N., Laptev R.S., Lider A.M., Koptuyug A. Influence of manufacturing parameters on microstructure and hydrogen sorption behavior of electron beam melted titanium Ti-6Al-4V alloy, *Materials*, 2018, 11 (5), pp. 763.
6. Choi Y., Dong-Geun Lee Correlation between surface tension and fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by EBM additive manufacturing, *Applied Surface Science*, 2019, Vol. 481, pp. 741-746.
7. Popov V.V. Jr., Katz-Demyanetza A., Garkuna A., Bamberger M. The effect of powder recycling on the mechanical properties and microstructure of electron beam melted Ti-6Al-4V specimens, *Additive Manufacturing*, 2018, 22, pp. 834-843.
8. Gockel J., Sheridan L., Koerper B., Whip B. The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life, *International Journal of Fatigue*, 2019, Vol. 124, pp. 380-388.
9. Chao Guo, Wenjun Ge, Feng Lin Effects of scanning parameters on material deposition during Electron Beam Selective Melting of Ti-6Al-4V powder, *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 217, pp. 148-157.
10. Antonysamy A.A., Meyer J., Prangnell P.B., Effect of build geometry on the grain structure and texture in additive manufacture of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting, *Materials Characterization*, 2013, 84, pp. 153-168.
11. Longhitano G. A., Arenas M. A., Conde A., Larosa M. A., Jardini A.L., Zavaglia C.A.C., Damborenea J. J. Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing, 2018, *Journal of Alloys and Compounds*, 765, pp. 961-968.
12. Vladimir Popov, Alexander Katz-Demyanetz, Andrey Garkun, Gary Muller, Evgeny Strokin, Haim Rosenson, Effect of Hot Isostatic Pressure treatment on the Electron-Beam Melted Ti-6Al-4V specimens, *Procedia Manufacturing*, 2018, Vol. 21, pp. 125-132.
13. Gou J., Shen J., Hu S., Tian Y., Liang Y. Microstructure and mechanical properties of as-built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, Vol. 42, pp. 41-50.
14. Аношкин Н.Ф. (ред.) Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов // М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
15. Yilbas B.S., Coban A., Kahraman R., Khaled M.M. Hydrogen embrittlement of Ti-6Al-4V alloy with surface modification by TiN coating. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1998, V. 23 (6), pp. 483-489.
16. Madina V, Azkarate I. Compatibility of materials with hydrogen. Particular case: Hydrogen embrittlement of titanium alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34, pp. 5976-5980.
17. Mishin I.P., Grabovetskaya G.P., Zabudchenko O.V., Stepanova E.N. Influence of Hydrogenation on Evolution of Submicrocrystalline Structure of Ti-6Al-4V Alloy upon Exposure to Temperature and Stress, 2014, *Russian Physics Journal*, Vol. 57(4), pp. 423-428.
18. Tal-Gutelmacher E. , Eliezer D. Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys, 2004, *Materials Transaction*, 45 (2004), pp. 1594-1600.

References

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 2015, V. 5, pp. 40-53.
2. (Sam) Froes F.H. Additive manufacturing of titanium components: An up-date. *Metal Powder Report*, 2018, 73 (6), pp. 329-337.
3. Dutta B., Froes F.H. The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report*, 2017, 72 (2), pp. 96-106.
4. Jones R., Raman Singh R.K., Iliopoulos A.P., Michopoulos J.G., Phan N., Peng D. Additively manufactured Ti-6Al-4V replacement parts for military aircraft, *International Journal of Fatigue*, 2019, V. 124, pp. 227-235.
5. Pushilina N.S., Syrtanov M.S., Kashkarov E.B., Murashkina T.L., Kudiiarov V.N., Laptev R.S., Lider A.M., Koptuyug A. Influence of manufacturing parameters on microstructure and hydrogen sorption behavior of electron beam melted titanium Ti-6Al-4V alloy, *Materials*, 2018, 11 (5), pp. 763.
6. Choi Y., Dong-Geun Lee Correlation between surface tension and fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by EBM additive manufacturing, *Applied Surface Science*, 2019, Vol. 481, pp. 741-746.
7. Popov V.V. Jr., Katz-Demyanetza A., Garkuna A., Bamberger M. The effect of powder recycling on the mechanical properties and microstructure of

- electron beam melted Ti-6Al-4V specimens, Additive Manufacturing, 2018, 22, pp. 834-843.
8. Gockel J., Sheridan L., Koerper B., Whip B. The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life, International Journal of Fatigue, 2019, Vol. 124, pp. 380-388.
 9. Chao Guo, Wenjun Ge, Feng Lin Effects of scanning parameters on material deposition during Electron Beam Selective Melting of Ti-6Al-4V powder, Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217, pp. 148-157.
 10. Antonysamy A.A., Meyer J., Prangnell P.B., Effect of build geometry on the grain structure and texture in additive manufacture of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting, Materials Characterization, 2013, 84, pp. 153-168.
 11. Longhitano G. A., Arenas M. A., Conde A., Larosa M. A., Jardini A.L., Zavaglia C.A.C., Damborenea J. J. Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing, 2018, Journal of Alloys and Compounds, 765, pp. 961-968.
 12. Vladimir Popov, Alexander Katz-Demyanetz, Andrey Garkun, Gary Muller, Evgeny Strokin, Haim Rosenson, Effect of Hot Isostatic Pressure treatment on the Electron-Beam Melted Ti-6Al-4V specimens, Procedia Manufacturing, 2018, Vol. 21, pp. 125-132.
 13. Gou J., Shen J., Hu S., Tian Y., Liang Y. Microstructure and mechanical properties of as-built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing, Journal of Manufacturing Processes, 2019, Vol. 42, pp. 41-50.
 14. Anoshkin N.F. (red.) Titanovye splavy. Metallografiya titanovykh splavov // M.: Metallurgiya, 1980. — 464 s.
 15. Yilbas B.S., Coban A., Kahraman R., Khaled M.M. Hydrogen embrittlement of Ti-6Al-4V alloy with surface modification by TiN coating. International Journal of Hydrogen Energy, 1998, V. 23 (6), pp. 483-489.
 16. Madina V, Azkarate I. Compatibility of materials with hydrogen. Particular case: Hydrogen embrittlement of titanium alloys. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34, pp. 5976-5980.
 17. Mishin I.P., Grabovetskaya G.P., Zabudchenko O.V., Stepanova E.N. Influence of Hydrogenation on Evolution of Submicrocrystalline Structure of Ti-6Al-4V Alloy upon Exposure to Temperature and Stress, 2014, Russian Physics Journal, Vol. 57(4), pp. 423-428.
 18. Tal-Gutelmacher E. , Eliezer D. Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys, 2004, Materials Transaction, 45 (2004), pp. 1594-1600.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №3(15) 2019

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.
