ISSN 1994-6309 (Print)
ISSN 2541-819X (Online)

Том 25, Номер 1 ЯНВАРЬ – МАРТ 2023

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

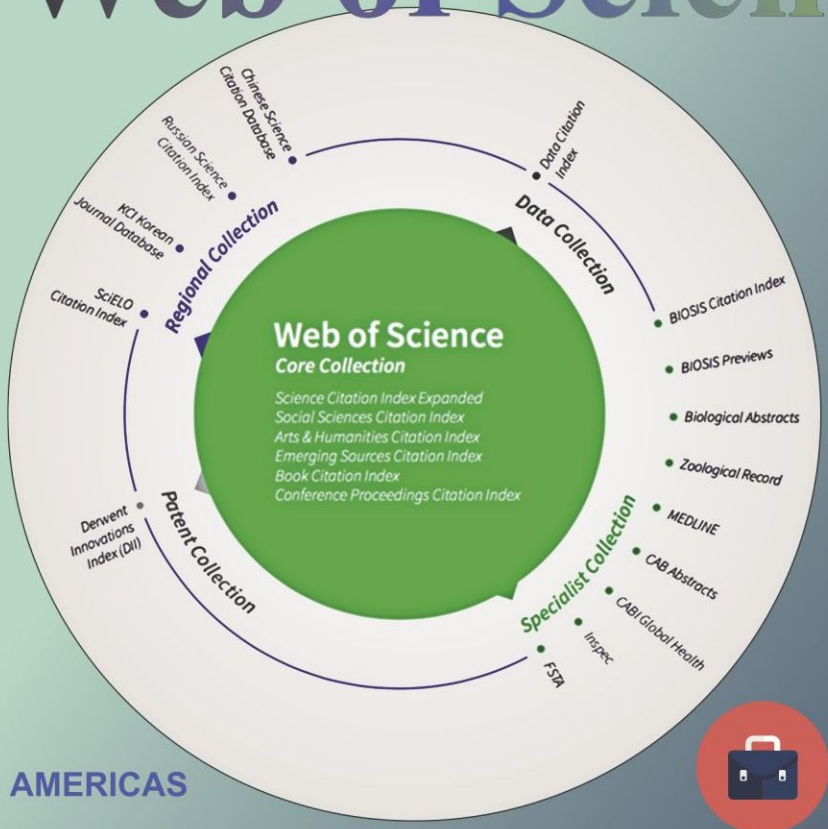
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science

Clarivate Analytics



Academic Search™ Ultimate

Applied Science & Technology Source™ Ultimate

Business Source ® Ultimate

Humanities Source™ Ultimate

Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

Расширенная версия ULTIMATE для успеха в научной работе

www.ebsco.com ▪ + 420 2 34 700 600 ▪ info.cr@ebsco.com

ISSN 1994-6309 (Print)
ISSN 2541-819X (Online)

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Том 25 № 1 2023 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Пустовой Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, президент НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

Члены совета

Федеративная Республика Бразилия: **Альберто Морейра Хорхе**, профессор, доктор технических наук, Федеральный университет, г. Сан Карлос

Федеративная Республика Германия: **Монико Грайф**, профессор, доктор технических наук, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, **Томас Хассел**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, **Флориан Нюрнбергер**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен

Испания: **Чувилин А.Л.**, кандидат физико-математических наук, профессор, научный руководитель группы электронной микроскопии «CIC nanoGUNE», г. Сан-Себастьян

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Украина: **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск

Российская Федерация: **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген. директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Лобанов Д.В.**, доктор техн. наук, доцент, ЧГУ, г. Чебоксары, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, член-корреспондент РАН, ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары

Журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» индексируется в крупнейших в мире реферативно-библиографических и наукометрических базах данных Web of Science и Scopus.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» теперь можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing) на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.

СОУЧРЕДИТЕЛИ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Батаев Анатолий Андреевич – профессор, доктор технических наук, ректор НГТУ

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцивский Владимир Владимирович – доцент, доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

Ложкина Елена Алексеевна – редактор перевода текста на английский язык, кандидат технических наук

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 01.03.2021 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80400

Индекс: **70590** по каталогу ООО «УП УРАЛ-ПРЕСС»

Адрес редакции и издателя:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5.

Тел. +7 (383) 346-17-75

Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru

Цена свободная

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Рябошук С.В., Ковалев П.В. Анализ причин образования дефектов заготовок из стали 12Х18Н10Т и разработка рекомендаций по их устранению..... 6

Лапшин В.П., Моисеев Д.В. Определение оптимального режима обработки металлов при анализе динамики систем управления резанием..... 16

Гимадеев М.Р., Ли А.А., Беркун В.О., Стельмаков В.А. Экспериментальное исследование динамики процесса механообработки концевыми сфероцилиндрическими фрезами..... 44

Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки..... 57

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Подгорный Ю.И., Кириллов А.В., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Лобанов Д.В., Мартюшев Н.В. Синтез механизма привода технологической машины непрерывного действия..... 71

Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Методика критериального анализа мультивариантных систем..... 85

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э., Попов Р.А. Особенности формирования диффузионных покрытий, полученных комплексной химико-термической обработкой конструкционных сталей..... 98

Филиппов А.В., Хорошко Е.С., Шамарин Н.Н., Колубаев Е.А., Тарасов С.Ю. Исследование свойств сплавов на основе кремниевой бронзы, напечатанных с применением технологии электронно-лучевого аддитивного производства..... 110

Лысых С.А., Корнопольцев В.Н., Мишигдоржийн У.Л., Хараев Ю.П., Тихонов А.Г., Иванцивский В.В., Вахрушев Н.В. Влияние продолжительности боромеднения на толщину диффузионного слоя и микротвердость углеродистых и легированных сталей..... 131

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ 149

МАТЕРИАЛЫ СОУЧЕРЕДИТЕЛЕЙ 159

Корректор *Л.Н. Ветчакова*
Художник-дизайнер *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 10.03.2023. Выход в свет 15.03.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 20,0. Уч.-изд. л. 37,2. Изд. № 46. Заказ 91. Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ISSN 1994-6309 (Print)
ISSN 2541-819X (Online)

OBRABOTKA METALLOV
METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

Volume 25 No.1 2023 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:
Anatoliy A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:
Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Vadim Y. Skeeba, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Editor of the English translation:
Elena A. Lozhkina, Ph.D. (Engineering),
Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

Data on the journal are published in
«Ulrich's Periodical Directory»

Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”) has been Indexed in Clarivate Analytics Services.

Journal “Obrabotka Metallov – Metal Working and Material Science” is indexed in the world's largest abstracting bibliographic and scientometric databases Web of Science and Scopus.

Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working & Material Science”) has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the EBSCOhost™ databases.

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia
Tel.: +7 (383) 346-17-75
http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru

EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:

Nikolai V. Pustovoy, D.Sc. (Engineering), Professor,
President, Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

Alberto Moreira Jorge Junior, Dr.-Ing., Full Professor;
Federal University of São Carlos, *São Carlos*

The Federal Republic of Germany:

Moniko Greif, Dr.-Ing., Professor,
Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, *Russelsheim*

Florian Nürnberger, Dr.-Ing.,
Chief Engineer and Head of the Department "Technology of Materials",
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*;

Thomas Hassel, Dr.-Ing.,
Head of Underwater Technology Center Hanover,
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*

The Spain:

Andrey L. Chuvilin, Ph.D. (Physics and Mathematics),
Ikerbasque Research Professor,
Head of Electron Microscopy Laboratory "CIC nanoGUNE",
San Sebastian

The Republic of Belarus:

Fyodor I. Panteleenko, D.Sc. (Engineering), Professor,
First Vice-Rector, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus,
Belarusian National Technical University, *Minsk*

The Ukraine:

Sergiy V. Kovalevskyy, D.Sc. (Engineering), Professor,
Vice Rector for Research and Academic Affairs,
Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

The Russian Federation:

Vladimir G. Atapin, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Victor P. Balkov, Deputy general director,
Research and Development Tooling Institute "VNIIINSTRUMENT", *Moscow*;

Vladimir A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Vladimir G. Burov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Aleksandr N. Gerasenko, Director,
Scientific and Production company "Mashservispribor", *Novosibirsk*;

Aleksandr N. Korotkov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Kuzbass State Technical University, *Kemerovo*;

Evgeniy A. Kudryashov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Southwest State University, *Kursk*;

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*;

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Corresponding Member of RAS,
Head of division, Head of laboratory (Laboratory of Mechanical Properties)
M.N. Miheev Institute of Metal Physics,
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*;

Aleksandr G. Ovcharenko, D.Sc. (Engineering), Professor,
Biysk Technological Institute, *Biysk*;

Yuriy N. Saraev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Institute of Strength Physics and Materials Science,
Russian Academy of Sciences (Siberian Branch), *Tomsk*;

Alexander S. Yanyushkin, D.Sc. (Engineering), Professor,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*

CONTENTS

TECHNOLOGY

Ryaboshuk S.V., Kovalev P.V. Analysis of the reasons for the formation of defects in the 12-Cr18-Ni10-Ti steel billets and development of recommendations for its elimination..... 6

Lapshin V.P., Moiseev D.V. Determination of the optimal metal processing mode when analyzing the dynamics of cutting control systems..... 16

Gimadeev M.R., Li A.A., Berkun V.O., Stelmakov V.A. Experimental study of the dynamics of the machining process by ball-end mills..... 44

Bratan S.M., Chasovitina A.S. Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece..... 57

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Podgornyj Yu.I., Kirillov A.V., Skeeba V.Yu., Martynova T.G., Lobanov D.V., Martyushev N.V. Synthesis of the drive mechanism of the continuous production machine..... 71

Lobanov D.V., Rafanova O.S. Methodology for criteria analysis of multivariant system..... 85

MATERIAL SCIENCE

Sokolov A.G., Bobylyov E.E., Popov R.A. Diffusion coatings formation features, obtained by complex chemical-thermal treatment on the structural steels..... 98

Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Kolubaev E.A., Tarasov S.Yu. Study of the properties of silicon bronze-based alloys printed using electron beam additive manufacturing technology..... 110

Lysykh S.A., Kornopoltsev V.N., Mishigdorzhiyn U.L., Kharaev Yu.P., Tikhonov A.G., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V. The effect of borocoppering duration on the composition, microstructure and microhardness of the surface of carbon and alloy steels..... 131

EDITORIAL MATERIALS 149

FOUNDERS MATERIALS 159

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 6–15
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-6-15

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Анализ причин образования дефектов заготовок из стали 12Х18Н10Т и разработка рекомендаций по их устранению

Сергей Рябошук [a, *], *Павел Ковалев* [b]

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-1183-8445, ryaboshuk_sv@spbstu.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-1066-3812, kovalev_pv@spbstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 62-4

История статьи:
Поступила: 01 октября 2022
Рецензирование: 01 ноября 2022
Принята к печати: 19 декабря 2022
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
12Х18Н10Т
Дефекты
Аустенит
Межкристаллитная коррозия
Мартенситная α-фаза
Ферритная δ-фаза
Нержавеющая сталь

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Аустенитная сталь марки 12Х18Н10Т получила широкое распространение, что обусловливается высокой коррозионной стойкостью и соответствующей возможностью использования в агрессивных средах. Можно выделить следующие наиболее распространенные виды дефектов стали данной марки: межкристаллитная коррозия, мартенситная ориентация α-фазы и ферритная δ-фаза. **Цель работы:** проанализировать причины образования дефектов заготовок из стали 12Х18Н10Т и разработать рекомендации по их устранению. **Методы исследования.** В работе проведены испытания образцов стали 12Х18Н10Т на стойкость к межкристаллитной коррозии, металлографический анализ дефектов. Осуществлены измерения твердости для различных степеней обжатия заготовок. Термодинамические расчёты фазового равновесия в многокомпонентной стали для различных температур выполнялись в программе *Thermo-Calc*. **Результаты и обсуждение.** Было определено, что для предотвращения межкристаллитной коррозии необходимо снизить содержание азота и углерода в стали на этапе внепечной обработки до 0,05 %, а также обеспечить концентрацию титана в стали не менее допустимого значения 0,3 %. Эти меры способствуют снижению карбидов хрома $Cr_{23}C_6$, ответственных за межкристаллитную коррозию. Для предотвращения появления ферромагнитной мартенситной α-фазы необходимо снижение степени обжатия заготовок до уровня не более 50 %, поскольку именно с высокой степенью обжатия при волочении связано образование данного дефекта. Высокотемпературная фаза δ-феррита существует в структуре металла в широком температурном интервале. Снижение этого диапазона до 100 градусов и менее путём оптимизации состава сплава по углероду и хрому в рамках ГОСТ 5632–2014 приводит к значительному снижению количества феррита. Однако полностью устранить его из структуры стали не представляется возможным. Для всех случаев необходимо назначение аустенизации заготовок в диапазоне температур 1050…1100 °С.

Для цитирования: *Рябошук С.В., Ковалев П.В.* Анализ причин образования дефектов заготовок из стали 12Х18Н10Т и разработка рекомендаций по их устранению // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-6-15.

Введение

В настоящее время нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т получила достаточно широкое распространение в энергетическом машиностроении вследствие её высоких коррозионных свойств, проявляющихся довольно в значительном интервале температур применения [1–5]. Этим объясняется необходимость повышения качества заготовок, выполняемых из этой стали, в частности, особенно ответственных, используемых в агрессивных средах. В этой связи необходимо отметить, что тематика, связанная с изучением наиболее характерных дефектов изделий из стали 12Х18Н10Т и поиском рекомендаций, направленных на их устранение, является достаточно актуальной.

Известно, что для стали марки 12Х18Н10Т наиболее характерны следующие основные дефекты структуры: межкристаллитная коррозия, наличие мартенситной α-фазы и δ-феррита [6–11].

Установлено, что межкристаллитная коррозия – это тип коррозии, за который ответственны

***Адрес для переписки**
Сергей Владимирович Рябошук, старший преподаватель,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, 29,
195251, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ryaboshuk_sv@spbstu.ru

карбиды хрома $Cr_{23}C_6$, выделяющиеся по границам аустенитных зёрен и способствующие снижению растворенного в матрице хрома до значений (менее 13 %), обеспечивающих локальное падение коррозионной стойкости [12–14]. Этот процесс интенсифицируется в течение длительных выдержек при температурах, соответствующих активному формированию карбида хрома, при этом коррозия распространяется в глубину зерна.

Для снижения склонности стали марки 12Х18Н10Т к данному типу коррозии реализуются мероприятия по термической обработке заготовок (закалка, отжиг), а также оптимизации химического состава, закладываемого при выплавке и внепечной обработке жидкого расплава [15–17].

При работе в условиях пониженных температур или в процессе холодной пластической деформации в структуре нержавеющей стали может происходить формирование мартенситной α-фазы, сопровождающееся повышением магнитных свойств материала. Данный переход является нежелательным для аустенитной стали, для его предотвращения осуществляется оптимизация химического состава и параметров прокатки [7, 18].

Формирование ферритной фазы в исследуемой стали начинается в начале затвердевания расплава, при дальнейшем охлаждении δ-феррит растворяется в аустените. Ввиду значительных скоростей охлаждения слитков этот процесс, как правило, неполный. Даже после горячей пластической деформации в структуре металла присутствует остаточная ферритная фаза, ухудшающая магнитные свойства. Более того, снижаются пластичность и трещиностойкость стали [19, 20].

На сегодняшний день довольно широко используются методы термодинамического моделирования для оценки влияния химического состава материалов на количество и тип фазовых составляющих. Подобная информация позволяет уточнить рекомендации и мероприятия по повышению качества металлопродукции [21–23].

Цель работы: провести исследования структуры основных дефектов нержавеющей марки стали 12Х18Н10Т; выполнить термодинамическое моделирование сопутствующих фазовых превращений; на основе проведенных исследований и расчетов дать рекомендации по повышению качества металла – снижению его дефектности.

Материалы и методики

В рамках данной работы испытания стали марки 12Х18Н10Т на стойкость против межкристаллитной коррозии проводились согласно ГОСТ 6032–2017 «Стали и сплавы коррозионностойкие». С поверхности термообработанных образцов химическим травлением удалялась окалина, после этого образцы выдерживались в кипящем водном растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии металлической меди. Время выдержки в зависимости от метода составляло 24 ч или 8 ч. После испытаний проводилось сгибание на 90±5° и осмотр на наличие трещин. Наличие трещин на образцах, изогнутых после испытания, и отсутствие трещин на изогнутых таким же образом контрольных образцах свидетельствовало о склонности стали к межкристаллитной коррозии.

Подготовка к металлографическому анализу заключалась в последовательной шлифовке, полировке образцов из нержавеющей стали и электрохимическом травлении в 10 %-м водном растворе щавелевой кислоты. Для подготовки проб использовалось оборудование фирмы Buehler Ltd.

При необходимости могла дополнительно осуществляться операция аустенизации образцов, а именно проводилась длительная выдержка в диапазоне 1000…1200 °С для снятия намагниченности и растворения ферритной фазы. Непосредственно металлографический анализ проводился при помощи микровизора μVIZOMET-221.

Измерение твердости по шкале Бринелля образцов нагартованного металла после холодной деформации осуществлялось при помощи твердомера ТБ 5015-01.

Термодинамическое моделирование выполнялось при помощи программного продукта Thermo-Calc. Данный комплекс позволяет осуществлять расчеты равновесия многокомпонентных многофазных систем при различных температурных условиях для различных химических составов. В частности, строились температурные зависимости массы основных фазовых составляющих нержавеющей стали 12Х18Н10Т, таких как феррита, аустенита, жидкой фазы, а также карбидных и нитридных включений.

Результаты и их обсуждение

Влияние содержания различных компонентов на образование межкристаллитной коррозии в нержавеющей стали

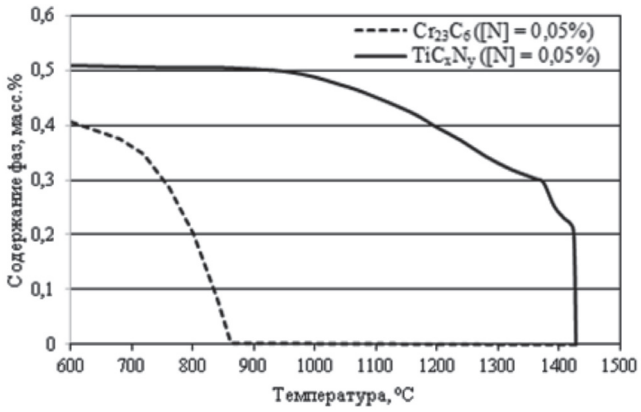
Для выявления особенностей появления межкристаллитной коррозии проводилась оценка образцов нержавеющей стали по методике, описанной выше. Проводилась фиксация наличия дефектов для различных химических составов. Для каждого состава проводилось термодинамическое моделирование – оценивалось количество и термовременная природа формирующихся карбидных и нитридных фаз: карбонитридов титана TiC_xN_y и карбидов типа $Cr_{23}C_6$. Обнаружена и подтверждена взаимосвязь между повышенным количеством карбидов хрома и дефектностью исследуемой стали.

Далее были осуществлены расчеты температурных зависимостей фазовых составляющих в широком диапазоне варьирования различных элементов стали 12Х18Н10Т (за исходный состав взят: C = 0,08 %, Cr = 18 %, Ni = 10 %, Mn = 1,5 %, Ti = 0,4 %). Наиболее значимыми стали такие элементы, как углерод и азот.

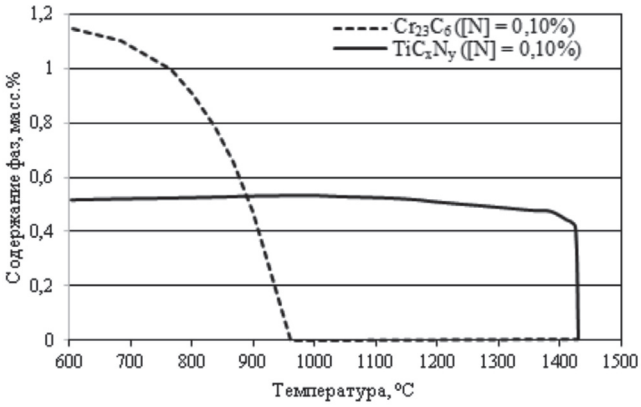
На рис. 1 представлена характерная термовременная природа карбидных и нитридных фаз в исследуемой стали для диапазона изменения азота N = 0,05…0,10 %.

При температурах около 1425 °С начинается процесс образования карбонитридов титана TiC_xN_y. Чем больше исходное содержание азота в стали, тем больше титана расходуется на формирование нитридной составляющей данной фазы и тем в меньшей степени титан связывает углерод в карбид. Таким образом, создаются условия для выделения данного углерода в виде карбидов $Cr_{23}C_6$. При значительном содержании азота (N = 0,1 %) карбиды хрома выделяются при 960 °С и достигают до 1,15 масс.%, при снижении азота до 0,05% температура образования падает на 100 °С и конечная масса составляет 0,4 масс.%.

Металлографические исследования подтверждают, что при увеличении содержания азота наблюдается повышение массы карбидов хрома $Cr_{23}C_6$, провоцирующих межкристаллитную коррозию. Не вступая в прямое взаимодействие с хромом, азот косвенно увеличивает количество карбидных фаз, связывая титан.



а



б

Рис. 1. Зависимость содержания карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ и карбонитридов титана TiC_xN_y от содержания азота в стали:

а – [N] = 0,05 %; *б* – [N] = 0,10 %

Fig. 1. Dependence of the content of chromium carbides $Cr_{23}C_6$ and titanium carbonitrides TiC_xN_y on the nitrogen content in steel:

a – [N] = 0.05 %; *б* – [N] = 0.10 %

Содержание углерода закономерно существенно влияет на количество соединений $Cr_{23}C_6$. Так, с повышением содержания углерода увеличивается их масса и температура начала образования. Результаты расчетов показывают, что критическим значением является C = 0,05 %, при котором выделения карбидов не наблюдается, значительная часть углерода связывается с титаном.

Таким образом, для минимизации появления дефектов, связанных с межкристаллитной коррозией, рекомендуется снижение азота и углерода до значений 0,05 % на этапе внепечной обработки жидкой стали. Рекомендуется также не снижать содержание титана в исследуемой стали менее 0,3 % в рамках допустимого марочного состава по ГОСТ 5632–2014.

В случае выявления данного дефекта в структуре металла на этапе входного контроля необходимо осуществление операции аустенизации стали при температурах, уточняемых термодинамическим расчетом для конкретного состава и составляющих около 1050…1100 °С.

Исследование причин возникновения мартенситной α-фазы

Металлографический анализ мартенситной α-фазы осуществлялся на образцах из прутков стали 12Х18Н10Т, полученных после стадии волочения. Исследовались образцы с различной степенью проявления данного дефекта, параллельно фиксировались технологические параметры холодной деформации.

Вычисления показывают, что в нержавеющих марках стали данного типа мартенсит формируется при отрицательных (по Цельсию) температурах, поэтому наиболее вероятно его деформационное происхождение. На рис. 2 представлен пример возникновения в металлургическом полуфабрикате такого мартенсита деформации.

Измерения твердости металла показывают, что наличие мартенсита в структуре сопровождается значительным наклёпом – образцы имеют твердость около 370 НВ. Подобные значения соответствуют повышенным степеням обжатия стали при изготовлении прутков. Анализ технологических параметров показал, что при степенях обжатия более 50 % в процессе изготовления полупродукта наблюдается избыточное количество мартенситной α-фазы.

Таким образом, появление данного дефекта в прутках из стали 12Х18Н10Т связано со стадией холодной деформации и возможно при превышении критической степени обжатия заготовки. При его формировании требуется назначение дополнительной стадии аустенизации металла.

Исследование ферритной δ-фазы в стали марки **12Х18Н10Т**

Для изучения причин образования δ-фазы в стали 12Х18Н10Т исследовались образцы разной толщины. На рис. 3 показан пример микроструктуры прутка диаметром 3 мм в направлении волочения.

Термодинамические расчеты показывают существование ферритной фазы в довольно широком интервале от 1250 до 1450 °С, зависящем от конкретного состава стали, в частности, содержания углерода, хрома, титана и других элементов. Этот диапазон может быть уменьшен путем снижения в стали ферритостабилизирующего элемента хрома и незначительного повышения углерода в рамках марочного состава (но не выше значения, рекомендуемого для устранения межкристаллитной коррозии 0,05 %) (рис. 4).

С целью минимизации количества δ-феррита в структуре и снятия намагниченности проводится аустенизация – выдержка при температуре 1050 °С. Эта температура находится вне расчетного диапазона, однако даже при выдержке в этом интервале ферритная фаза не растворяется

Рис. 2. Возникновение мартенситной α-фазы в стали 12Х18Н10Т, пруток Ø4 мм

Fig. 2. Occurrence of martensitic α-phase in steel 12-Cr18-Ni10-Ti, rod Ø4 mm

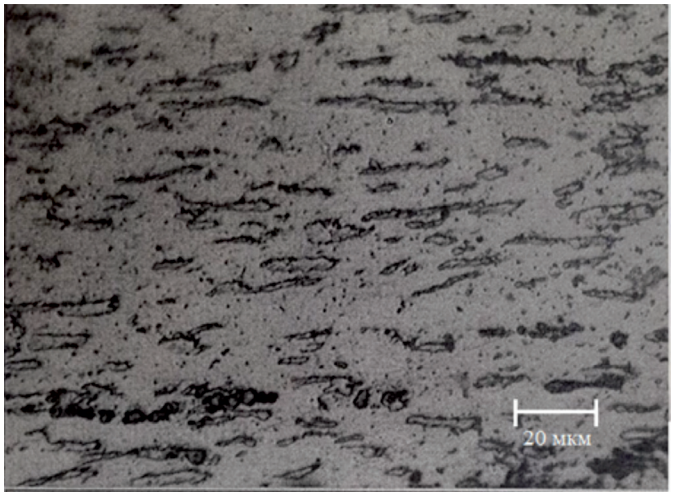


Рис. 3. Микроструктура прутка Ø 3 мм из стали марки 12Х18Н10Т после проведения аустенизации

Fig. 3. Microstructure of a rod Ø 3 mm made of steel grade 12-Cr18-Ni10-Ti after austenization

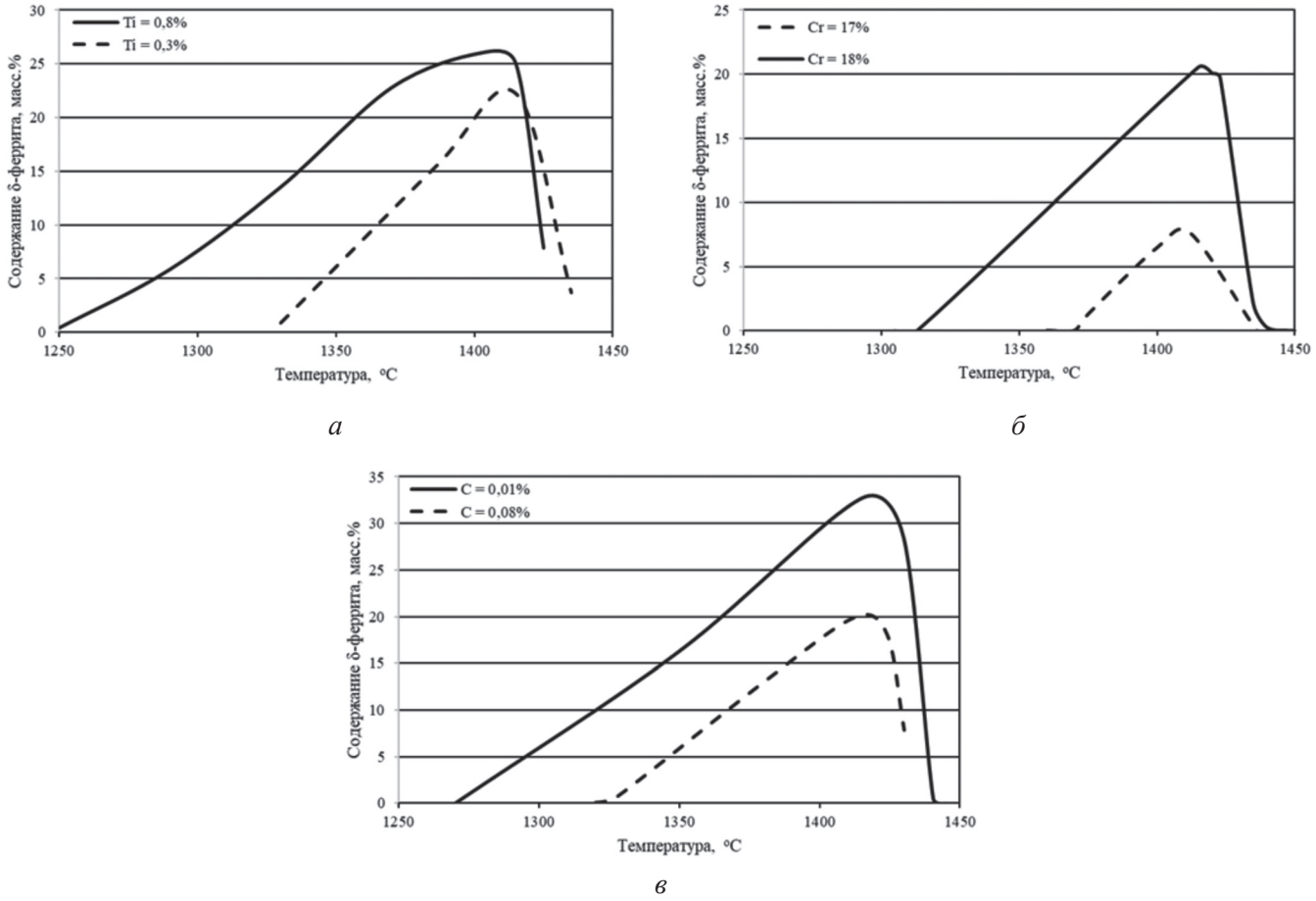


Рис. 4. Зависимость содержания δ-феррита в стали марки 12Х18Н10Т при различных содержаниях, легирующих элементов:

а – влияние титана; *б* – влияние хрома; *в* – влияние углерода

Fig. 4. Dependence of the content of *δ*-ferrite in steel *12-Cr18-Ni10-Ti* at different alloying contents:

a – the effect of titanium; *б* – the effect of chromium; *в* – the effect of carbon

полностью по кинетическим причинам. Остаточные выделения δ-фазы сфероидизируются и уменьшаются в размерах.

Сравнение результатов спектрального анализа, металлографических исследований и термодинамического моделирования показывает, что повышенное количество ферритной фазы в стали 12Х18Н10Т соответствует широкому расчетному температурному диапазону его существования (около 200 градусов). В случае сокращенного интервала (100 градусов и менее) наличие феррита минимально и намагниченность незначительная. Однако даже в случае высокотемпературной аустенизации полностью δ-феррит не устраняется. Таким образом, для минимизации появления данного дефекта требуется оптимизация состава по углероду и хрому, а также операция аустенизации.

Заключение

В рамках выполненной работы проведены подробные исследования причин образования дефектов микроструктуры нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т: межкристаллитной коррозии, мартенситной фазы и δ-феррита. На основе полученных результатов и термодинамических расчетов сформулированы рекомендации по их устранению.

Для минимизации количества карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ и, следовательно, повышения стойкости стали к межкристаллитной коррозии рекомендуется снижение содержания азота и углерода до 0,05 % методами внепечной обработки жидкого расплава. Необходимо наличие титана в стали не менее 0,3 % в рамках ГОСТ 5632–2014.

С целью предотвращения формирования мартенсита в нержавеющей стали при холодной

деформации (волочении) требуется снижение степени обжатия не более 50 %.

Чтобы избежать наличия в структуре избыточной высокотемпературной ферритной фазы, рекомендуется оптимизировать химический состав по хрому и углероду для снижения температурного интервала выделения феррита.

Во всех трёх случаях назначается операция аустенизации заготовок в диапазоне температур 1050…1100 °С.

Список литературы

1. *Урбан Д.* Новые хромистые стали для использования в условиях высоких температур // Черные металлы. – 2018. – № 7. – С. 67–68.

2. Features of high-amperage electrolyzer hearth breakdown / V.M. Sizyakov, V.Yu. Bazhin, R.K. Patrin, R.Yu. Feshchenko, A.V. Saitov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2013. – Vol. 54. – P. 151–154.

3. High-temperature corrosion performance of austenitic stainless steels type AISI 316L and AISI 321H, in molten solar salt / A. Gomes, M. Navas, N. Uranga, T. Paiva, I. Figueira, T.C. Diamantino // Solar Energy. – 2019. – Vol. 177. – P. 408–419.

4. A computational approach to evaluate the sensitization propensities of UNS S32100 and UNS S34700 stainless steels / R. Ayer, Y. Ro, I. Park, J. Shim, J. Nam, J. Kim // Corrosion 2018. – Phoenix, Arizona, USA, 2018. – P. NACE-2018-10574. – URL: https://onepetro.org/NACECORR/proceedings-abstract/CORR18/All-CORR18/NACE-2018-10574/125882 (accessed 26.01.2023).

5. Software for modeling brazing process of spacecraft elements from widely used alloys / V. Tynchenko, V. Bukhtoyarov, D. Rogova, A. Myrugin, Y. Seregin, A. Bocharov // 2022 21st International Symposium INFOTEH-Jahorina (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. – IEEE, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/INFOTEH53737.2022.9751246.

6. An electrochemical study on the effect of stabilization and sensitization heat treatments on the intergranular corrosion behaviour of AISI 321H austenitic stainless steel / K. Morshed-Behbahani, P. Najafisayar, M. Pakshir, M. Shahsavari // Corrosion Science. – 2018. – Vol. 138. – P. 28–41.

7. *Feng Z., Zecevic M., Knezevic M.* Stress-assisted ($\gamma \rightarrow \alpha'$) and strain-induced ($\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$) phase transformation kinetics laws implemented in a crystal plasticity model for predicting strain path sensitive deformation of austenitic steels // International Journal of Plasticity. – 2021. – Vol. 136. – P. 102807.

8. Effect of δ-ferrite on the stress corrosion cracking behavior of 321 stainless steel / J. Wang, H. Su, K. Chen, D. Du, L. Zhang, Z. Shen // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 158. – P. 108079.

9. *Hu D., Li S.L., Lu S.* Effects of TIG process on corrosion resistance of 321 stainless steel welding joint // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 749. – P. 173–179.

10. Analysis of the causes of cracks in the production of ingots and forgings from austenitic stainless steel 08Х18Н10Т (AISI 321) / A.D. Davydov, O.O. Erokhina, S.V. Ryaboshuk, P.V. Kovalev // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 854. – P. 16–22.

11. Analytical review of the foreign publications about the methods of rise of operating parameters of cathode blocks during 1995–2014 / R.Yu. Feshchenko, O.O. Erokhina, A.L. Kvanin, D.S. Lutskiy, V.V. Vasilyev // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 13. – P. 48–52.

12. Beneficial effect of reversed austenite on the intergranular corrosion resistance of martensitic stainless steel / C. Man, C. Dong, D. Kong, L. Wang, X. Li // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 151. – P. 108–121.

13. *Choudhary S.* Field experience with chloride stress corrosion cracking of stainless steels below 60° C in condensate stabilization unit // OnePetro. – 2022. – P. SPE-210992-MS. – DOI: 10.2118/210992-MS.

14. Corrosion characteristics of iron-nickel-chromium alloys in molten nitrate salts under isothermal and thermal cycling conditions / Q. Liu, C. Wang, A. Neville, R. Barker, J. Qian, F. Pessu // OnePetro. – 2022. – P. AMPP-2022-17529. – URL: https://onepetro.org/amppcorr/proceedings-pdf/AMPP22/5-AMPP22/D051S049R002/2724564/ampp-2022-17529.pdf (accessed: 26.01.2023).

15. *Ковалюк Е.Н., Горевая М.А., Тумурова В.П.* Изучение питтинговой и межкристаллитной коррозии сталей 12Х15Г9НД и 12Х18Н10Т // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 7. – С. 27–32.

16. *Чубуков А.И., Новиков А.В.* Исследование стойкости сварных соединений сталей AISI 316TI и 10Х17Н13М2Т и 12Х18Н10Т к межкристаллитной коррозии // Наука в движении: от отражения к созданию реальности: материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Альметьевск, 15 июня 2017 г. – М., 2017. – С. 173–178.

17. Grain orientation dependence of nanoindentation and deformation-induced martensitic phase transformation in neutron irradiated AISI 304L stainless steel / K.S. Mao, C. Sun, Y. Huang, C.-H. Shiau, F.A. Garner, P.D. Freyer, J.P. Wharry // Materialia. – 2019. – Vol. 5. – P. 100208. – DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100208.

18. *Saied M.* Experimental and numerical modeling of the dissolution of δ-ferrite in the Fe-Cr-Ni system:

Application to austenitic stainless steels: PhD thesis. – University Grenoble Alpes, 2016. – 220 p.

19. *Leone G.L., Kerr H.W.* The ferrite to austenite transformation in stainless steels // Welding Research Supplement. – 1982. – Vol. 61 (1). – P. 13s–22s.

20. *Kalmykova T.D., Kuznetsov V.V.* Kinetic and thermodynamic aspects of flotation beneficiation of polymetallic raw materials // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 266. – P. 02015. – DOI: 10.1051/e3sconf/202126602015.

21. Development of a methodology for studying the influence of technological factors of production on the quality of large ingots from stamped steel grades 5ХНМ and 56NiCrMoV7 / P.V. Kovalev, E.S. Kazantsev, S.V. Ryaboshuk, O.O. Erokhina, I.A. Matveev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1582. – P. 012028. – DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012028.

22. Analysis of the gasket damage and sealing performance for the thread ring block heat exchanger / F. Zhuang, W. Sui, G. Xie, S. Shao, Z. Han, W. Liu // Pressure Vessels and Piping Conference. – ASME, 2019. – Vol. 1. – P. V001T01A068. – DOI: 10.1115/PVP2019-93055.

23. Roles of different components of complex inclusion in pitting of 321 stainless steel: Induction effect of CaS and inhibition effect of TiN / X. Tan, Y. Jiang, Y. Chen, A. Tong, J. Li, Y. Sun // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 209. – P. 110692. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110692.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 6–15
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-6-15

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Analysis of the reasons for the formation of defects in the 12-Cr18-Ni10-Ti steel billets and development of recommendations for its elimination

Sergey Ryaboshuk [a, *], ***Pavel Kovalev*** [b]

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-1183-8445, ryaboshuk_sv@spbstu.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-1066-3812, kovalev_pv@spbstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 01 October 2022
Revised: 01 November 2022
Accepted: 19 December 2022
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Austenitic steel
12-Cr18-Ni10-Ti
Integranular corrosion
δ-ferrite
Martensitic orientation of the α-phase

Acknowledgements
Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introdution. Austenitic steel (e.g., *AISI 304*, *AISI 321*, *AISI 316*, *AISI 403*, 12-Cr18-Ni10-Ti, etc.) is widespread, which is caused by high corrosion resistance and the corresponding possibility of use in aggressive media. The following most common types of 12-Cr18-Ni10-Ti steel defects can be distinguished: integranular corrosion, martensitic orientation of the α-phase and ferrite δ-phase. **The purpose of work:** to analyze the defects formation reasons of the 12-Cr18-Ni10-Ti steel grade billets and to develop recommendations for their elimination. **The methods of investigation.** Tests of 12-Cr18-Ni10-Ti steel samples for resistance to integranular corrosion, metallographic analysis of defects were carried out in this work. Hardness measurements were carried out for various degrees of billets reduction. Thermodynamic calculations of phase equilibrium in multicomponent steel for different temperatures were performed by the *Thermo-Calc* software. **Results and Discussion.** It is determined that in order to prevent integranular corrosion, it is necessary to reduce the nitrogen and carbon content in steel at the stage of ladle refining to 0.05%, and also to ensure the concentration of titanium in steel is not less than the permissible value — 0.3%. These measures contribute to the reduction of $Cr_{23}C_6$ chromium carbides responsible for integranular corrosion. It is necessary to reduce the degree of compression of the billets to a level of no more than 50% to prevent the appearance of a ferromagnetic martensitic α-phase, since the formation of this defect is associated with a high degree of compression during drawing. The high-temperature phase of δ-ferrite exists in the metal structure in a wide temperature range. Reducing this range to 100 degrees or less by optimizing the composition of the carbon and chromium alloy in accordance with GOST 5632-2014 leads to a significant reduction of the amount of ferrite. However, it is not possible to completely eliminate it from the structure of steel. For all cases, it is necessary to assign austenization of billets in the temperature range of 1,050…1,100 °C.

For citation: Ryaboshuk S.V., Kovalev P.V. Analysis of the reasons for the formation of defects in the 12-Cr18-Ni10-Ti steel billets and development of recommendations for its elimination. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-6-15. (In Russian).

References

1. Urban D. Novye khromistye stali dlya ispol'zovaniya v usloviyakh vysokikh temperatur [New chromium steels for high temperature applications]. *Chernye metally*, 2018, no. 7, pp. 67–68. (In Russian).

2. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Patrin R.K., Feshchenko R.Yu., Saitov A.V. Features of high-amperage electrolyzer hearth breakdown. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2013, vol. 54, pp. 151–154.

3. Gomes A., Navas M., Uranga N., Paiva T., Figueira I., Diamantino T.C. High-temperature corrosion performance of austenitic stainless steels type AISI 316L and AISI 321H, in molten Solar salt. *Solar Energy*, 2019, vol. 177, pp. 408–419.

*** Corresponding author**
Ryaboshuk Sergey V., Senior Lecturer
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya st.,
195251, St. Petersburg, Russian Federation
e-mail: ryaboshuk_sv@spbstu.ru

4. Ayer R., Ro Y., Park I., Shim J., Nam J., Kim J. A computational approach to evaluate the sensitization propensities of UNS S32100 and UNS S34700 stainless steels. *Corrosion 2018*, Phoenix, Arizona, USA, 2018, p. NACE-2018-10574. Available at: https://onepetro.org/NACECORR/proceedings-abstract/CORR18/All-CORR18/NACE-2018-10574/125882 (accessed 26.01.2023).

5. Tynchenko V., Bukhtoyarov V., Rogova D., Myrugin A., Seregin Y., Bocharov A. Software for modeling brazing process of spacecraft elements from widely used alloys. *2022 21st International Symposium INFOTEH-Jahorina (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2022, pp. 1–5, DOI: 10.1109/INFOTEH53737.2022.9751246.

6. Morshed-Behbahani K., Najafisayar P., Pakshir M., Shahsavari M. An electrochemical study on the effect of stabilization and sensitization heat treatments on the intergranular corrosion behaviour of AISI 321H austenitic stainless steel. *Corrosion Science*, 2018, vol. 138, pp. 28–41.

7. Feng Z., Zecevic M., Knezevic M. Stress-assisted ($\gamma \rightarrow \alpha'$) and strain-induced ($\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$) phase transformation kinetics laws implemented in a crystal plasticity model for predicting strain path sensitive deformation of austenitic steels. *International Journal of Plasticity*, 2021, vol. 136, p. 102807.

8. Wang J., Su H., Chen K., Du D., Zhang L., Shen Z. Effect of δ-ferrite on the stress corrosion cracking behavior of 321 stainless steel. *Corrosion Science*, 2019, vol. 158, p. 108079.

9. Hu D., Li S.L., Lu S. Effects of TIG process on corrosion resistance of 321 stainless steel welding joint. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 749, pp. 173–179.

10. Davydov A.D., Erokhina O.O., Ryaboshuk S.V., Kovalev P.V. Analysis of the causes of cracks in the production of ingots and forgings from austenitic stainless steel 08X18H10T (AISI 321). *Key Engineering Materials*, 2020, vol. 854, pp. 16–22.

11. Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Kvanin A.L., Lutskiy D.S., Vasilyev V.V. Analytical review of the foreign publications about the methods of rise of operating parameters of cathode blocks during 1995–2014. *CIS Iron and Steel Review*, 2017, vol. 13, pp. 48–52.

12. Man C., Dong C., Kong D., Wang L., Li X. Beneficial effect of reversed austenite on the intergranular corrosion resistance of martensitic stainless steel. *Corrosion Science*, 2019, vol. 151, pp. 108–121.

13. Choudhary S. Field experience with chloride stress corrosion cracking of stainless steels below 60° C in condensate stabilization unit. *OnePetro*, 2022, p. SPE-210992-MS. DOI: 10.2118/210992-MS.

14. Liu Q., Wang C., Neville A., Barker R., Qian J., Pessu F. Corrosion characteristics of iron-nickel-chromium alloys in molten nitrate salts under isothermal and thermal cycling conditions. *OnePetro*, 2022, p. AMPP-2022-17529. Available at: https://onepetro.org/amppcorr/proceedings-pdf/AMPP22/5-AMPP22/D051S049R002/2724564/ampp-2022-17529.pdf (accessed: 26.01.2023).

15. Kovalyuk E.N., Gorevaya M.A., Tumurova V.P. Izuchenie pittingovoi i mezhkristallitnoi korrozii stalei 12Kh15G9ND i 12Kh18N10T [Study of pitting and intergranular corrosion of steels 12Kh15G9ND and 12Kh18N10T]. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: Materals, Protection*, 2014, no. 7, pp. 27–32. (In Russian).

16. Chubukov A.I., Novikov A.V. [Study of resistance of welded joints of AISI 316TI and 10X17H13M2T and 12X18H10T steels to intergranular corrosion]. *Nauka v dvizhenii: ot otrazheniya k sozdaniyu real'nosti*: materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Science in motion: from reflection to the creation of reality"], Almetyevsk, 2017, pp. 173–178. (In Russian).

17. Mao K.S., Sun C., Huang Y., Shiau C.-H., Garner F.A., Freyer P.D., Wharry J.P. Grain orientation dependence of nanoindentation and deformation-induced martensitic phase transformation in neutron irradiated AISI 304L stainless steel. *Materialia*, 2019, vol. 5, p. 100208. DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100208.

18. Saied M. *Experimental and numerical modeling of the dissolution of δ-ferrite in the Fe-Cr-Ni system: Application to austenitic stainless steels*. PhD thesis. University Grenoble Alpes, 2016. 220 p.

19. Leone G.L., Kerr H.W. The ferrite to austenite transformation in stainless steels. *Welding Research Supplement*, 1982, vol. 61 (1), pp. 13s–22s.

20. Kalmykova T.D., Kuznetsov V.V. Kinetic and thermodynamic aspects of flotation beneficiation of polymetallic raw materials. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 266, p. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/202126602015.

21. Kovalev P.V., Kazantsev E.S., Ryaboshuk S.V., Erokhina O.O., Matveev I.A. Development of a methodology for studying the influence of technological factors of production on the quality of large ingots from stamped steel grades 5XHM and 56NiCrMoV7. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1582, p. 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012028.

22. Zhuang F., Sui W., Xie G., Shao S., Han Z., Liu W. Analysis of the gasket damage and sealing performance for the thread ring block heat exchanger. *Pressure Vessels and Piping Conference*. ASME, 2019, vol. 1, p. V001T01A068. DOI: 10.1115/PVP2019-93055.

23. Tan X., Jiang Y., Chen Y., Tong A., Li J., Sun Y. Roles of different components of complex inclusion in pitting of 321 stainless steel: Induction effect of CaS and inhibition effect of TiN. *Corrosion Science*, 2022, vol. 209, p. 110692. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110692.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 16–43
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Определение оптимального режима обработки металлов при анализе динамики систем управления резанием

Виктор Лапшин [a, *], ***Денис Моисеев*** [b]

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-5114-0316, lapshin1917@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-7186-7758, denisey2003@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:
Поступила: 15 декабря 2022
Рецензирование: 12 января 2023
Принята к печати: 21 января 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Динамика
Вибрации инструмента
Устойчивость резания
Скорость обработки
Износ
Регенеративный эффект

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. В многочисленных экспериментальных исследованиях процессов обработки металлов резанием на металлорежущих станках отмечается существование некоторого оптимального режима обработки, который наиболее ярко сформулировал А.Д. Макаров в своем положении о существовании оптимальной температуры резания (скорости обработки). Здесь авторами из России акцент делается на описании оптимальности процессов обработки, связанных со свойствами обрабатываемого материала и свойствами используемого при этом инструмента. Однако в западной научной литературе существует другое мнение, которое в целом опирается на регенеративную природу вибраций в динамике резания. Регенерацию вибраций связывают с динамикой процесса резания, на которую существенно влияет запаздывающий аргумент, отражающий вариативность срезаемого слоя. Связь этих двух подходов видится через анализ области устойчивости динамической системы резания в пространстве параметров: скорости резания и величины износа инструмента. **Предмет.** Исходя из этого в статье рассматривается вопрос связи между оптимальным, по Макарову А.Д., режимом обработки и динамикой процесса резания, включающей в себя регенерацию вибраций инструмента при токарной обработке металлов. Для этого формулируются две исследовательские гипотезы и производится численное моделирование с целью определения их достоверности. **Цель работы.** Рассмотреть положение А.Д. Макарова о существовании оптимального режима резания с точки зрения устойчивости динамики токарной обработки металлов, для чего в работе выдвигаются две гипотезы, подлежащие анализу. **В работе исследована:** математическая модель, описывающая динамику вибрационных колебаний вершины режущего клина с учетом динамики формируемой в зоне контакта температуры и ее влияния на силы, препятствующие формообразующим движениям инструмента. **Методы исследования.** Проведена серия натурных экспериментов на металлообрабатывающем станке с использованием возможностей измерительного стенда STD.201-1, целью которых было определение влияния температурного расширения металлов на значение выталкивающей силы. На основе численного моделирования исходных нелинейных математических моделей, а также моделирования линеаризованных в окрестности точки равновесия моделей проведен анализ устойчивости системы резания при вариации скорости резания и величины износа инструмента по задней грани. **Результаты работы.** Приведены результаты натурных экспериментов, которые показали существенный линейный рост выталкивающей инструмент силы при увеличении температуры в контакте инструмента и обрабатываемой детали, результаты моделирования координат состояния и соответствующих им фазовых траекторий при врезании режущего клина в обрабатываемую деталь, а также силы, разложенные вдоль оси деформации инструмента. Представлены результаты моделирования годографа вектора Михайлова для линеаризованной модели динамики процесса резания. **Выводы.** Результаты исследований показали, что только вторая разработанная авторами гипотеза позволяет адекватно интерпретировать положение, приведенное А.Д. Макаровым. Основным дополнением к описанию положения А.Д. Макарова авторы считают необходимость учета изменений выталкивающей силы при росте температуры контакта инструмента и обрабатываемой детали.

Для цитирования: *Лапшин В.П., Моисеев Д.В.* Определение оптимального режима обработки металлов при анализе динамики систем управления резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 16–43. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43.

Введение

Качество процесса обработки металлов резанием на металлорежущих станках, а также стойкость режущего инструмента связаны с устойчивостью вибрационной динамики процесса

***Адрес для переписки**
Лапшин Виктор Петрович, к.т.н., доцент
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тел.: 8 (900) 122-75-14, **e-mail:** lapshin1917@yandex.ru

резания. Вибрации вершины инструмента при резании зависят от двух групп факторов: первая группа – вибрационная активность, не связанная с событиями, протекающими в зоне резания, а вторая группа – это вибрационная активность, вызванная процессами, протекающими в зоне резания. В связи с этим большое значение приобретает разработка методов и способов минимизации вибрационной активности, природа которой определяется процессом резания.

Вибрации инструмента, сопровождающие процесс резания, во многом определяются регенерацией колебаний при резании по «следу», которая получила название «регенеративный эффект» [1–4]. В этих работах отмечается, что главным фактором влияющим на регенеративный эффект, является так называемая временная задержка “time delay” [5–7], именно она определяющим образом влияет на устойчивость динамики процесса. Помимо регенеративного характера самовозбуждения вибрационной динамики системы резания на устойчивость вибраций режущего инструмента влияют: температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали [8], изменения силовой реакции со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента [9], величина, характеризующая степень изношенности режущего клина, и т. д. [10]. Однако развивающаяся сегодня синергетическая концепция описания процессов, протекающих в станках [11, 12], позволяет говорить не о каждом отдельно взятом факторе, а о некоторой совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих факторов, определяющих механизм самовозбуждения системы управления резанием [13, 14].

Важнейшим фактором сложности математического описания динамики процессов обработки является уже указанная ранее временная задержка “time delay”, которая и определяет регенеративный характер самовозбуждения системы резания. Здесь надо отметить, что в процессе линеаризации системы интегродифференциальных уравнений, описывающих сложную нелинейную с запаздыванием динамику процесса обработки, придется иметь дело с элементом, содержащим запаздывающий аргумент. Такой элемент не позволит провести анализ системы дифференциальных уравнений системы управления резанием с использованием линеаризованной модели в окрестности точки равновесия на основе алгебраических критериев, таких как критерий Гурвица [15] или критерий Рауса [16]. Решением этой проблемы выступает использование частотных критериев устойчивости, таких, как критерий Найквиста [17, 18] или его советский аналог критерий Михайлова [19–21]. Сам критерий Найквиста в приложении к математическим моделям систем управления резанием металлов хорошо рассмотрен в работах Заковоротного В.Л. [11, 12], а вот критерий Михайлова, хорошо и давно известный в американской инженерной школе [21], пока широко не применяется.

Целью такого моделирования может быть определение некоторого наилучшего режима резания, т. е. такого режима, при котором фактор самовозбуждения системы управления резанием будет сведен к минимуму. Экспериментально уже доказано, что такой режим существует и он связан со скоростью резания [22, 23]. В указанных работах под наилучшим режимом понимается режим, обеспечивающий минимальную шероховатость обрабатываемой поверхности и максимальную размерную стойкость режущего инструмента. К примеру, А.Д. Макаров в своей монографии [22] формулирует следующее утверждение: «важнейшим фактором, определяющим характеристики процесса резания, является средняя температура контакта, определяемая режимом резания (скорость резания)». В этой и других работах температура контакта инструмента определяется текущей мощностью, выделяемой при резании и преобразованной в тепло, которая линейно зависит от скорости резания. Однако в статье [8] было показано, что при формировании износа режущего клина по задней грани формируется дополнительная термодинамическая обратная связь, которая предварительно за период до текущего момента резания прогревает зону резания. В последующем это приведет к температурному расширению материала обрабатываемой детали, которое увеличит значение выталкивающей инструмент силы. Отметим, что этот фактор перестройки силовой реакции, которая подтверждается экспериментальными исследованиями [9], ранее не учитывался при формировании математических моделей систем резания.

Сам А.Д. Макаров в своих рассуждениях опирался на следующие известные факторы:

1) падающий характер силы резания (температурно-скоростной фактор обработки), выяв-

ленный и представленный в виде графической характеристики еще в работах Н.Н. Зорева [24];

2) существование «благоприятных условий» в зоне резания, интерпретируемых переходом от адгезионной природы к диффузионной природе трения [22].

Помимо этих факторов обработки можно учитывать еще один немаловажный температурный фактор – это линейное расширение металла при росте температуры контакта. Отметим, что вместе с температурным расширением металла происходит рост выталкивающей силы, что будет приводить к перестройке всей системы резания и к возможной потере устойчивости [9]. С точки зрения моделирования динамики процесса обработки максимум стойкости режущего клина совпадает с максимумом запаса устойчивости динамической системы резания. Перефразируя положение А.Д. Макарова, можно сказать, что в динамической системе резания существует некоторый оптимальный по запасу устойчивости этой системы режим резания, напрямую связанный со скоростью (температурой) резания и величиной износа режущего клина.

В связи с вышеизложенным ***цель работы*** состоит в рассмотрении положения А.Д. Макарова о существовании оптимального режима резания с точки зрения устойчивости динамики токарной обработки металлов. Приведенные выше рассуждения позволяют сформулировать две гипотезы, проверка соответствия которых положению Макарова А.Д. станет задачами исследования.

Гипотеза № 1. Оптимальное значение скорости резания (температуры резания) при моделировании динамики процесса обработки определяется совокупностью следующих факторов: падающей характеристикой силы резания (по Н.Н. Зореву) и минимумом коэффициента трения, связанного с переходом трения от адгезионной к диффузионной природе.

Гипотеза № 2. Оптимальное значение скорости резания (температуры резания) при моделировании динамики процесса обработки определяется совокупностью следующих факторов: падающей характеристикой силы резания (по Н.Н. Зореву), минимумом коэффициента трения, обусловленным переходом трения от адгезионной к диффузионной природе, и зависимостью выталкивающей инструмент силы от предварительного прогрева зоны обработки.

Проверка первой гипотезы

Формирование математической модели системы управления резанием

При формировании математической модели рассмотрим совокупную силовую реакцию процесса резания на формообразующие движения инструмента, опираясь при этом на синергетическую концепцию и механико-термодинамический подход. Реализация синергетической концепции при синтезе математической модели будет состоять в том, что силы описываются в координатах состояния процесса, а механико-термодинамический подход состоит в том, что помимо координат состояния системы резания силовая реакция будет включать в себя динамику производства и рассеивания температуры в процессе обработки.

Для удобства формирования математической модели рассмотрим основные оси координат деформации, вдоль которых будут расписываться уравнения движения (рис. 1).

На схеме, представленной на рис. 1, принято разложение деформаций на три основные оси: ось x – осевое направление деформаций (мм); ось y – радиальное направление деформаций (мм) и ось z – тангенциальное направление деформаций (мм). Вдоль тех же осей силовая реакция разлагается от процесса резания на формообразующие движения инструмента (*Ff*, *Fp*, *Fc (N)*), *Vf* и *Vc* (мм/с) скоростей подачи и резания,

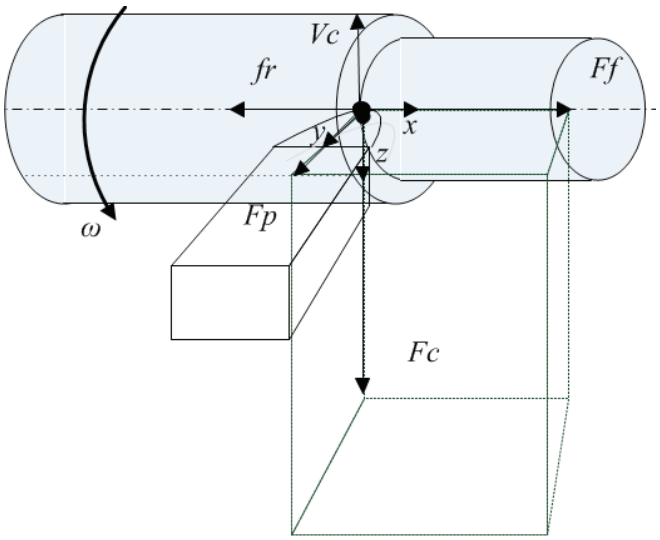


Рис. 1. Схема координат и сил модели

Fig. 1. Diagram of the coordinates and forces of the model

соответственно ω – угловая скорость шпинделя (рад/с).

Описание силы резания обобщим на основе гипотезы пропорциональности ее площади срезаемого слоя в виде

$$F_i = \rho a_p S \chi_i \,, \qquad (1)$$

где χ_i – некоторый коэффициент разложения общего вектора сил реакции на *i*-ю ось деформации инструмента. Здесь надо отметить, что такой подход широко применяется в рамках научной школы Заковоротного В.Л. [12]; глубина обработки a_p также будет зависеть от деформаций инструмента и обрабатываемой детали $a_p = a_{p0} - y$, где t_{p0} – технологически заданная глубина обработки без учета деформаций инструмента и детали, величина подачи на оборот – S.

Величина подачи может быть представлена в виде следующего интеграла:

$$S = \int_{t-T_V}^{t} \left(V_f - \frac{dx}{dt} \right) dt \,, \qquad (2)$$

где T_V – период вращения детали.

Важнейшей составляющей силы резания является составляющая силы, которая формируется не в зоне первичной деформации и трения стружки о переднюю грань инструмента, а на задней грани инструмента, где формируется выталкивающая сила и сила трения в направлении главного движения. Эта составляющая силы зависит от износа инструмента по задней грани, поэтому, опираясь на подход, предложенный в работе Заковоротного В.Л. [22], опишем формируемую здесь силу как

$$F_h = \sigma S_h e^{-K_h x} \,, \qquad (3)$$

где σ – предел прочности обрабатываемого металла при сжатии в [кг/мм^2]; K_h – коэффициент крутизны нарастания силы; S_h – площадь контакта инструмента и обрабатываемой детали по задней поверхности режущего клина, которую определяют как $S_h = h_3 t_p$, S_h – коэффициент, определяющий крутизну нелинейного увеличения площади контакта инструмента и обрабатываемой детали при сближении инструмента и обрабатываемой детали.

Через главный угол в плане φ разложим силовую реакцию на оси деформации *x* и *y* следующим образом:

$$\begin{cases} F_h^{(x)} = \cos\varphi F_h, \\ F_h^{(y)} = \sin\varphi F_h. \end{cases} \qquad (4)$$

Силовая реакция в направлении координаты *z* по своей сути не что иное, как сила трения, которую можно представить как

$$F_h^{(z)} = k_t F_h \,, \qquad (5)$$

где k_t – коэффициент трения.

Используя предложенный Макаровым А.Д. подход [22], идентифицируем характеристику коэффициента трения следующим выражением:

$$k_t = k_{0t} + \Delta k_t \left[e^{-K_{f1}Q} + e^{K_{f2}Q} \right] / 2 \,, \qquad (6)$$

где k_{0t} – некоторое постоянное минимальное значение коэффициента трения; Δk_t – величина приращения коэффициента трения при изменении температуры в зоне контакта; K_{f1} и K_{f2} – коэффициенты, определяющие крутизну падения и роста характеристики коэффициента трения.

Таким образом, обобщая описание силовой реакции со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента, получим следующие уравнения, описывающие силовую реакцию:

$$\begin{cases} F_f = \chi_1 F + F_h^{(x)}, \\ F_p = \chi_2 F + F_h^{(y)}, \\ F_c = \chi_3 F + F_h^{(z)}. \end{cases} \qquad (7)$$

Помимо силовой и термодинамической подсистемы системы резания в общей структуре системы управления (см. рис. 1) присутствует подсистема деформационных движений вершины инструмента, которая опосредованно входила в наши рассуждения, но напрямую моделью не представлена. Учитывая предложенные выражением (6) зависимости сил реакции, а также опираясь на подход к моделированию динамики

деформационного движения инструмента, используемый в научной школе Заковоротного В.Л. [12] , примем, что модель деформаций вершины инструмента будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2} + h_{11}\dfrac{dx}{dt} + h_{12}\dfrac{dy}{dt} + \\ + h_{13}\dfrac{dz}{dt} + c_{11}x + c_{12}y + c_{13}z = F_f, \\ m\dfrac{d^2y}{dt^2} + h_{21}\dfrac{dx}{dt} + h_{22}\dfrac{dy}{dt} + \\ + h_{23}\dfrac{dz}{dt} + c_{21}x + c_{22}y + c_{23}z = F_p, \\ m\dfrac{d^2z}{dt^2} + h_{31}\dfrac{dx}{dt} + h_{32}\dfrac{dy}{dt} + \\ + h_{33}\dfrac{dz}{dt} + c_{31}x + c_{32}y + c_{33}z = F_c. \end{cases}, \quad (8)$$

где m [кг · с^2/мм]; h [кг · с/мм]; c [кг/мм] – матрицы инерционных коэффициентов, коэффициентов диссипации и коэффициентов жесткости соответственно.

В результате эволюции режущего клина формируется площадка контакта по задней грани, длина которой будет определять время взаимодействия, которое определяется скоростью резания. Преобразование мощности резания в температуру требует предварительного формализованного описания самой мгновенной мощности резания, которую удобно представить следующим выражением:

$$N = F_c\left(V_c - \frac{dz}{dt}\right) = \left(\chi_3 F + F_h^{(z)}\right)\left(V_c - \frac{dz}{dt}\right). \quad (9)$$

Используя предложенный в работе [8] подход, синтезируем дифференциальное уравнение, описывающее термодинамическую составляющую системы, как

$$T_1T_2\frac{d^2Q_z}{dt^2} + (T_1 + T_2)\frac{dQ_z}{dt} + Q_z = kN, \quad (10)$$

где $T_1 = \dfrac{\lambda}{\alpha_1}$; $T_2 = \dfrac{T_h}{\alpha_2} = \dfrac{h_3}{V_c\alpha_2}$; $k = \dfrac{k_Q\lambda h_3}{\alpha_1\alpha_2V_c}$ – коэффициент передачи; α_1, α_2 – безразмерные масштабирующие параметры; λ – коэффициент температуропроводности; k_Q – коэффициент, характеризующий преобразование мощности необратимых превращений, выделяемой в зоне контакта инструмент–заготовка, в температуру.

Таким образом, системы уравнений (8)–(10) и будут являться математической моделью системы резания.

Критерий Михайлова и линеаризация системы уравнений

Для оценки устойчивости системы управления на основе критерия Михайлова используется характеристический полином передаточной функции системы управления:

$$D(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n, \quad (11)$$

где n – степень полинома и она же – порядок дифференциального уравнения для случая, представленного выражениями (8), (10), $n = 8$.

Полагая $p = j\omega$, преобразуем характеристический полином в комплексный частотный полином:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \ldots + \\ + a_{n-1}(j\omega) + a_n.$$

В случае устойчивых систем годограф вектора Михайлова имеет свойство начинаться с точки $U(0) = a_n$, $V(0) = 0$. По мере увеличения ω от нуля до бесконечности точка M(U,V) перемещается влево так, что кривая стремится охватить начало координат, одновременно удаляясь от него. Если провести радиус-вектор из начала координат в точку M(U,V), то окажется, что радиус-вектор будет поворачиваться против часовой стрелки, непрерывно увеличиваясь.

Сам критерий Михайлова сформулируем так: если при изменении частоты от нуля до бесконечности годограф Михайлова начинается на действительной оси в точке a_n, последовательно проходит против часовой стрелки n квадрантов комплексной плоскости, не проходя через нуль, и уходит в бесконечность в n-м квадранте, то система устойчива. В случае неустойчивых систем кривые не охватывают начало координат, при этом, если годограф начинается из начала координат или проходит через начало координат, система находится на границе устойчивости.

Для оценки устойчивости системы управления методом Михайлова потребуется определить характеристический полином системы управления, описываемой системой уравнений (8), (10). Поскольку эта система нелинейная, то первое, что потребуется, линеаризовать эту систему уравнений в некоторой окрестности точки равновесия, что и сделано ниже.

$$
\begin{cases}
m\dfrac{d^2x}{dt^2} + h_{11}\dfrac{dx}{dt} + h_{12}\dfrac{dy}{dt} + h_{13}\dfrac{dz}{dt} + x\left[c_{11} + \chi_1\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu) + \cos(\varphi)h_3\sigma t_p\alpha_2\right] + \\
+y\left[c_{12} + \chi_1(\rho + \rho\mu)S_p + \cos(\varphi)\sigma h_3\right] + c_{13}z + Q\chi_1\rho\mu\alpha_1 t_p S_p = 0, \\
m\dfrac{d^2y}{dt^2} + h_{21}\dfrac{dx}{dt} + h_{22}\dfrac{dy}{dt} + h_{23}\dfrac{dz}{dt} + x\left[c_{21} + \chi_2(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu) + \sin(\varphi)h_3\sigma t_p\alpha_2\right] + \\
+y\left[c_{22} + \chi_2(\rho + \rho\mu)S_p + \sin(\varphi)\sigma h_3\right] + c_{23}z + Q\chi_2\rho\mu\alpha_1 t_p S_p = 0, \\
m\dfrac{d^2z}{dt^2} + h_{31}\dfrac{dx}{dt} + h_{32}\dfrac{dy}{dt} + h_{33}\dfrac{dz}{dt} + x\left[c_{31} + \chi_3\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu) + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p\right] + \\
+y\left[c_{32} + \chi_3(\rho + \rho\mu)S_p + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\right] + c_{33}z + \\
Q\left[\chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3\right] = 0, \\
(T_1T_2)\dfrac{d^2Q}{dt^2} + (T_1 + T_2)\dfrac{dQ}{dt} + \dfrac{dz}{dt}\left[k_0\chi_3 t_p S_p(\rho + \rho\mu) + k_0(k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3 t_p\right] + \\
+\dfrac{dz}{dt}\left[k_1\chi_3 t_p S_p(\rho + \rho\mu) + k_1(k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3 t_p\right]e^{-jT_v\omega} + \\
+x\left[\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu)V_c k_0 + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p V_c k_0\right] + \\
+x\left[\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu)V_c k_1 + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p V_c k_1\right]e^{-jT_v\omega} + \\
+y\left[\chi_3(\rho + \rho\mu)S_p k V_c + (k_{0t} + \Delta k_t)k V_c\sigma h_3\right] + \\
y\left[\chi_3(\rho + \rho\mu)S_p k_1 V_c + (k_{0t} + \Delta k_t)k_1 V_c\sigma h_3\right]e^{-jT_v\omega} + \\
+Q\left[1 + \chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p k V_c + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3 k V_c\right] + \\
+Qe^{-jT_v\omega}\left[\chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p k_1 V_c + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3 k_1 V_c\right] = 0.
\end{cases}
\tag{12}
$$

В системе (12) $e^{-jT_v\omega}$ не что иное, как запаздывающий аргумент, где T_v – период вращения детали. Для последующего анализа системы управления перейдем к операторной форме записи системы (12), т. е. осуществим преобразование Лапласа, считая, что начальные условия нулевые ($p = d/dt$), получим:

$$
\begin{cases}
mp^2x(p) + h_{11}px(p) + h_{12}py(p) + h_{13}pz(p) + \\
+x(p)\left[c_{11} + \chi_1\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu) + \cos(\varphi)h_3\sigma t_p\alpha_2\right] + \\
+y(p)\left[c_{12} + \chi_1(\rho + \rho\mu)S_p + \cos(\varphi)\sigma h_3\right] + c_{13}z(p) + Q(p)\chi_1\rho\mu\alpha_1 t_p S_p = 0, \\
mp^2y(p) + h_{21}px(p) + h_{22}py(p) + h_{23}pz(p) + \\
+x(p)[c_{21} + \chi_2(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu) + \sin(\phi)h_3\sigma t_p\alpha_2] + \\
+y(p)[c_{22} + \chi_2(\rho + \rho\mu)S_p + \sin(\phi)\sigma h_3] + c_{23}z(p) + Q(p)\chi_2\rho\mu\alpha_1 t_p S_p = 0, \\
mp^2z(p) + h_{31}px(p) + h_{32}py(p) + h_{33}pz(p) + \\
+x(p)\left[c_{31} + \chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu) + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p\right] + \\
+y(p)[c_{32} + \chi_3(\rho + \rho\mu)S_p + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3] + c_{33}z(p) + Q(p)[\chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p + \\
+\dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3] = 0, \\
(T_1T_2)p^2Q(p) + (T_1 + T_2)pQ(p) + \\
+pz(p)\left[k_0\chi_3 t_p S_p(\rho + \rho\mu) + k_0(k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3 t_p\right] + \\
+pz(p)\left[k_1\chi_3 t_p S_p(\rho + \rho\mu) + k_1(k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3 t_p\right]e^{-jT_v\omega} + \\
+x(p)\left[\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu)V_c k_0 + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p V_c k_0\right] + \\
+x(p)\left[\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu)V_c k_1 + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p V_c k_1\right]e^{-jT_v\omega} + \\
+y(p)\left[\chi_3(\rho + \rho\mu)S_p k V_c + (k_{0t} + \Delta k_t)kV_c\sigma h_3\right] + \\
+y(p)\left[\chi_3(\rho + \rho\mu)S_p k_1 V_c + (k_{0t} + \Delta k_t)k_1 V_c\sigma h_3\right]e^{-jT_v\omega} + \\
+Q(p)\left[1 + \chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p k V_c + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3 k V_c\right] + \\
+Q(p)e^{-jT_v\omega}\left[\chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p k_1 V_c + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3 k_1 V_c\right] = 0.
\end{cases}
\tag{13}
$$

Систему (13) удобно рассматривать в матрично-векторном виде:

$$
\begin{pmatrix}
a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\
a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\
a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\
a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44}
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
x(p) \\ y(p) \\ z(p) \\ Q(p)
\end{pmatrix} = 0\,, \tag{14}
$$

где коэффициенты имеют следующее значение:

$$
\begin{cases}
a_{11} = mp^2 + h_{11}p + c_{11} + \chi_1\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu) + \cos(\varphi)h_3\sigma t_p\alpha_2, \\
a_{12} = h_{12}p + c_{12} + \chi_1(\rho + \rho\mu)S_p + \cos(\varphi)\sigma h_3, \\
a_{13} = h_{13}p + c_{13}, \\
a_{14} = \chi_1\rho\mu\alpha_1 t_p S_p, \\
a_{21} = h_{21}p + c_{21} + \chi_2\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu) + \sin(\varphi)h_3\sigma t_p\alpha_2, \\
a_{22} = mp^2 + h_{22}p + c_{22} + \chi_2(\rho + \rho\mu)S_p + \sin(\varphi)\sigma h_3, \\
a_{23} = h_{23}p + c_{23}, \\
a_{24} = \chi_2\rho\mu\alpha_1 t_p S_p, \\
a_{31} = h_{31}p + c_{31} + \chi_3\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu) + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p, \\
a_{32} = h_{32}p + c_{32} + \chi_3(\rho + \rho\mu)S_p + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3, \\
a_{33} = mp^2 + h_{33}p + c_{33}, \\
a_{34} = \chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3, \\
a_{41} = \chi_3\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)(\rho + \rho\mu)V_c k_0 + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p V_c k_0 + \\
+\left[\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})(\rho + \rho\mu)V_c k_1 + (k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3\alpha_2 t_p V_c k_1\right]e^{-jT_v\omega}, \\
a_{42} = \chi_3(\rho + \rho\mu)S_p k_0 V_c + (k_{0t} + \Delta k_t)k_0 V_c\sigma h_3 + \\
+\left[\chi_3(\rho + \rho\mu)S_p k_1 V_c + (k_{0t} + \Delta k_t)k_1 V_c\sigma h_3\right]e^{-jT_v\omega}, \\
a_{43} = p\left[k_0\chi_3 t_p S_p(\rho + \rho\mu) + k_0(k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3 t_p\right] + \\
+p\left[k_1\chi_3 t_p S_p(\rho + \rho\mu) + k_1(k_{0t} + \Delta k_t)\sigma h_3 t_p\right]e^{-jT_v\omega}, \\
a_{44} = (T_1T_2)p^2 + (T_1 + T_2)p + \left[1 + \chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p k_0 V_c + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3 k_0 V_c\right] + \\
+e^{-jT_v\omega}\left[\chi_3\rho\mu\alpha_1 t_p S_p k_1 V_c + \dfrac{\Delta k_t}{2}(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})t_p\sigma h_3 k_1 V_c\right].
\end{cases}
\tag{15}
$$

В последующем необходимо перейти во временную область, проведя замену $p = j\omega$, а характеристический полином системы управления не что иное, как определитель матрицы A, представленной в уравнении (14):

$$
D(j\omega) = \det(A) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}. \tag{16}
$$

Таким образом, выражение (16) и есть характеристический полином системы управления, который нужно исследовать на поведение на комплексной плоскости при изменении частоты ω от нуля до бесконечности.

Результаты моделирования и обсуждение первой гипотезы

Для удобства представления поведения системы моделирование проводилось в пакете Matlab/Simulink 2014, где в Simulink напрямую моделировалась нелинейная система (8), (10), а характеристический полином (16) рассчитывался циклом в самом Matlab, где на каждом шаге цикла считался определитель $D(j\omega)$ для конкретного значения частоты ω, и полученное значение откладывалась на комплексную плоскость, затем все повторялось. В целом рассчитывалось значение $D(j\omega)$ для ω от нуля до 2000 Гц с шагом 0.01 Гц.

Для оценки устойчивости системы управления резанием методом Михайлова были рассмотрены варианты системы управления, вариант устойчивой и вариант неустойчивой (на границе устойчивости) системы. Фактором, влияющим на устойчивость процесса резания, в данном случае являлся износ инструмента по задней грани, второй фактор – это фактор скорости обработки. Здесь имеет место возможность проверки положения А.Д. Макарова. Всего было рассмотрено 29 скоростных режимов резания, в каждом из которых исследовался устойчивый, неустойчивый и на границе устойчивости режим резания.

Рассмотрим совокупность параметров системы управления резанием, подлежащей исследованию, которая включает скорость обработки в 1600 оборотов в минуту и величину износа в 0.22 мм. Результаты моделирования координат состояния системы и соответствующих им фазовых траекторий представлены на рис. 2.

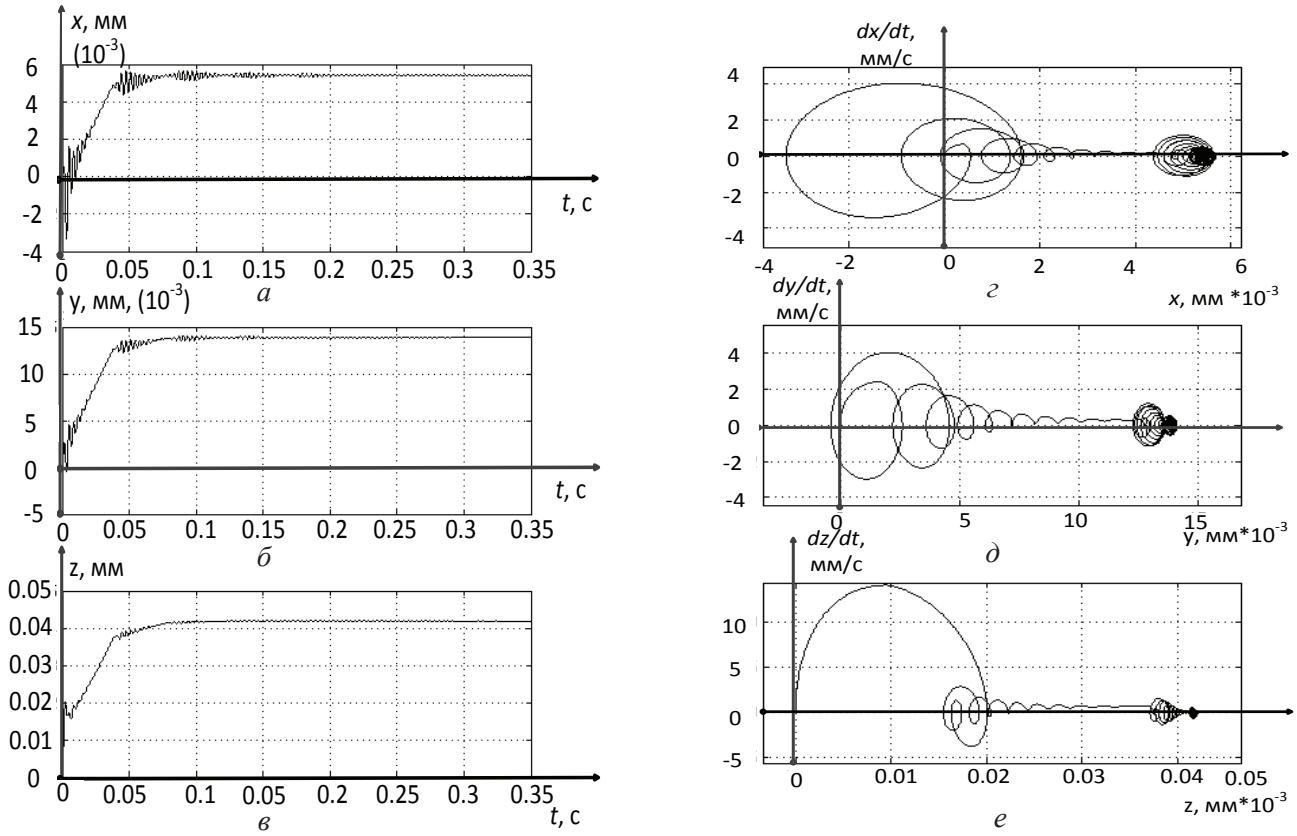


Рис. 2. Для случая износа h = 0,22:

а – деформации по координате *x*; *б* – деформации по координате *y*; *в* – деформации по координате *z*; *г* – фазовая траектория по координате *x*; *д* – фазовая траектория по координате *y*; *е* – фазовая траектория, вдоль *z*-координаты

Fig. 2. For the case of wear h = 0.22:

а – deformations along the *x* coordinate; *б* – deformations along the *y* coordinate; *в* – deformations along the *z* coordinate; *г* – phase trajectory along the *x* coordinate; *д* – phase trajectory along the *y* coordinate; *е* – phase trajectory along the *z* coordinate

Как видно из рис. 2, система устойчива, помимо этого из фазовых траекторий видно, что в системе происходит постоянная перестройка системы управления, сопровождающаяся сжатием фазовой траектории. Однако каждый цикл перестройки и последующего сжатия связан с резанием по «следу», который образовался при врезании инструмента на первом обороте.

Оценка устойчивости по критерию Михайлова для рассматриваемого варианта параметров системы управления резанием представлена на рис. 3.

Годограф вектора Михайлова, представленный на рис. 3, подтверждает вывод об устойчивости системы управления резанием, который мы сделали по анализу координат деформационных движений вершины инструмента ранее. Особенностью годографа вектора Михайлова является постоянное увеличение амплитуды годографа при росте частоты моделирования, поэтому описание годографа приходится делать двумя рисунками: на рис. 3, *а* мы видим движение годографа через первые пять квадрантов, а на рис. 3, *б* годограф охватывает точку ноль еще через три квадранта.

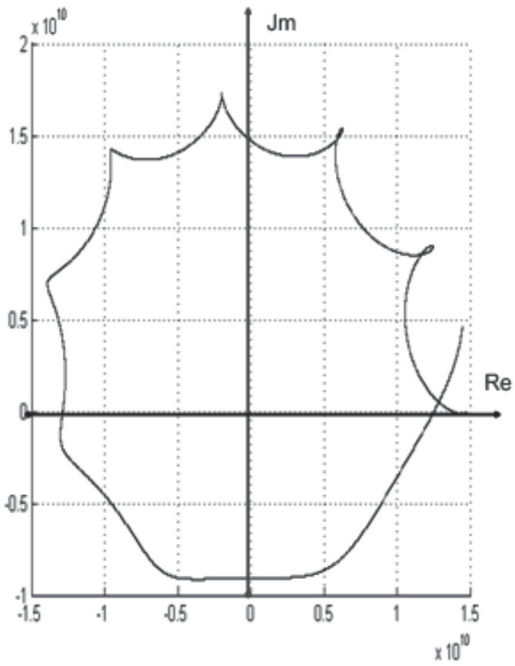
Граница устойчивости для случая обработки со скоростью 1600 оборотов в минуту наступает при величине износа в 0.473 мм, результаты моделирования годографа вектора Михайлова для этого варианта моделирования системы управлением резанием приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, годограф вектора Михайлова касается мнимой оси и возвращается обратно в первую четверть, если эта характеристика пересечет мнимую ось и вернется назад, то это и будет механизмом отображения потери устойчивости системы. В последующем при росте величины изношенности режущего клина именно так и происходит.

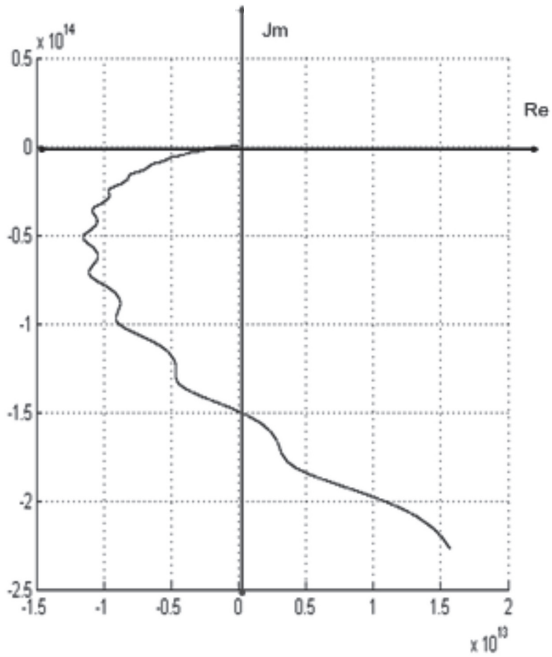
Результаты всех исследований сведены в одну общую таблицу, которая приведена ниже.

Графически область устойчивой динамики процесса резания, соответствующая данным, приведенным в табл. 1, представлена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, граница устойчивости системы резания имеет тенденцию к неограниченному росту, при этом нет ярко выраженного максимума этой характеристики. Иными словами, область устойчивой динамики системы резания не имеет локального экстремума, который



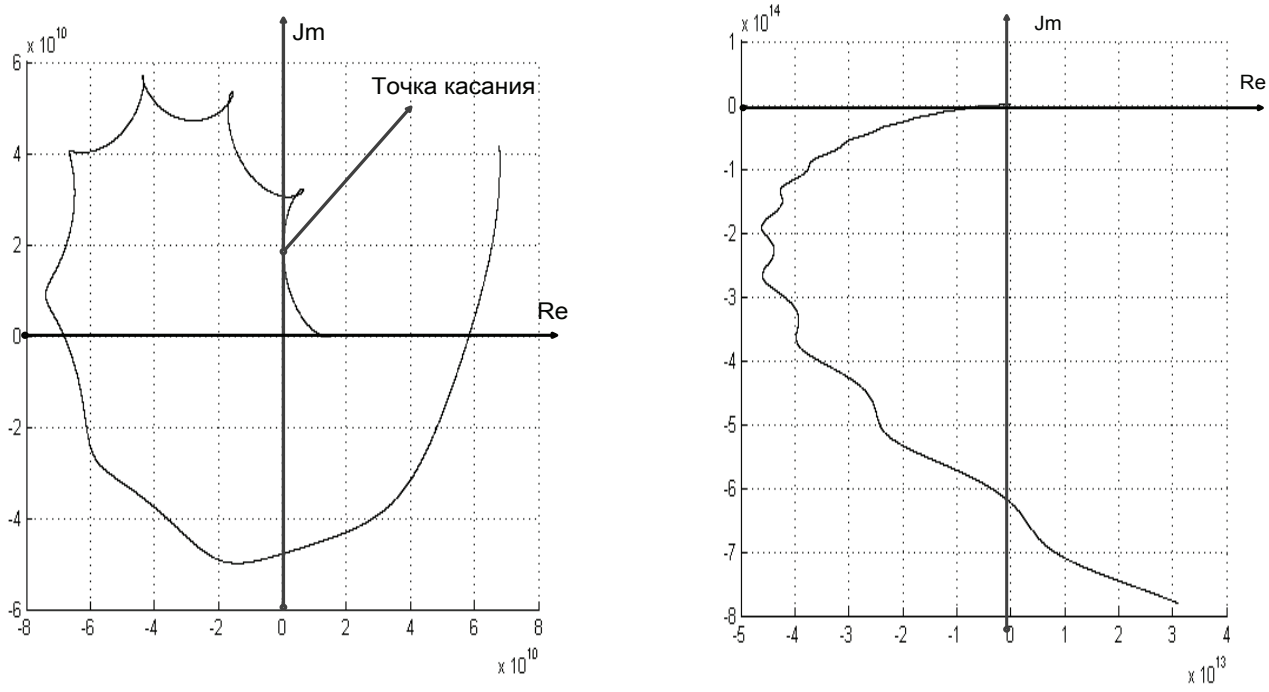
а



б

Рис. 3. Годограф вектора Михайлова, устойчивая система:
а – начало вектора Михайлова; *б* – окончание вектора Михайлова

Fig. 3. The hodograph of the *Mikhailov* vector, a stable system:
а – the beginning of the *Mikhailov* vector; *б* – the end of the *Mikhailov* vector



а *б*

Рис. 4. Годограф вектора Михайлова, система на границе устойчивости:
а – начало вектора Михайлова; *б* – окончание вектора Михайлова

Fig. 4. The hodograph of the *Mikhailov* vector, the system on the boundary of stability:
а – the beginning of the *Mikhailov* vector; *б* – the end of the *Mikhailov* vector

Таблица 1
Table 1

Граница устойчивости системы резания

The boundary of stability of the cutting system

h_3(мм)	0.3	0.32	0.34	0.35	0.37	0.38	0.4	0.41	0.42	0.43
n (об/м)	300	340	400	440	500	600	660	700	760	820
h_3(мм)	0.436	0.44	0.445	0.4455	0.455	0.46	0.46	0.473	0.483	0.491
n (об/м)	880	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800

отображал бы максимум размерной стойкости инструмента, соответствующего положению, выдвинутому А.Д. Макаровым.

Причиной такого странного поведения системы управления резанием может быть то, что приведенная в этом разделе модель системы управления фактически не включает в себя структурную перестройку силовой реакции, которая выявлена и описана в работе [9]. Для уточнения этого предположения рассмотрим вариант силовых реакций при скорости резания в 1600 оборотов в минуту, которые показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что несмотря на значительное изменение изношенности режущего клина по задней грани, стационарные составляющие сил реакции на формообразующие движения почти не изменились, а также не меняются и соотношения между этими силами, что явно противоречит предположению о перестройке сил реакции.

Таким образом, первая гипотеза, выдвинутая в начале работы, не может быть использована в качестве обоснования научного положения, предложенного А.Д. Макаровым. Иными словами,

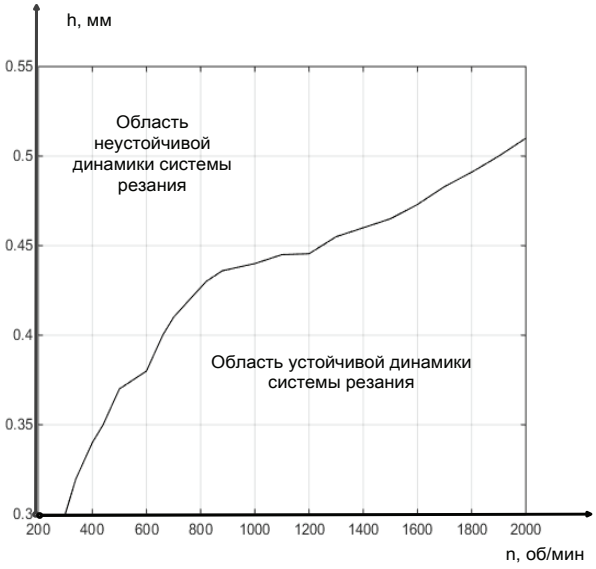


Рис. 5. Области устойчивого и неустойчивого поведения системы резания

Fig. 5. Areas of stable and unstable behavior of the cutting system

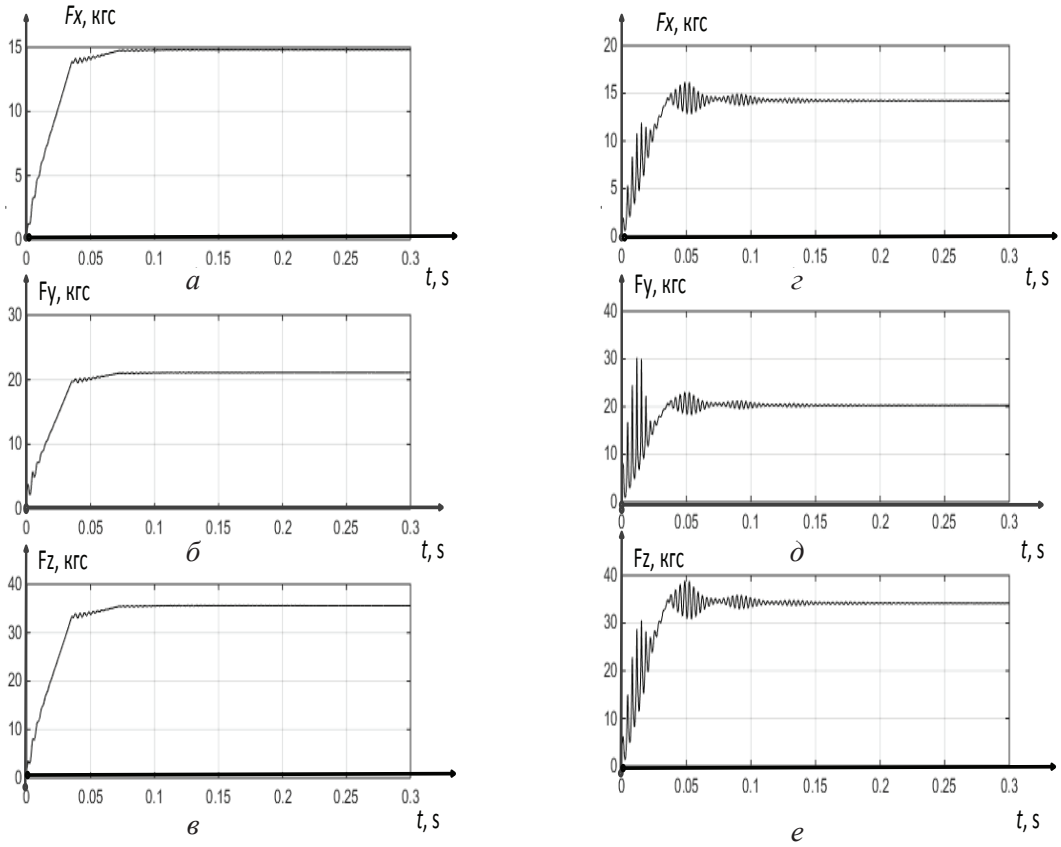


Рис. 6. Силы реакции для варианта со скоростью резания в 1 600 об/мин:

а – F_x для $h = 0.22$; *б* – F_y для $h = 0.22$; *в* – F_z для $h = 0.22$; *г* – F_x для $h = 0.49$; *д* – F_y для $h = 0.49$; *е* – F_z для $h = 0.49$

Fig. 6. Reaction forces for the option with a processing speed of 1,600 rpm:

а – F_x for $h = 0.22$; *б* – F_y for $h = 0.22$; *в* – F_z for $h = 0.22$; *г* – F_x for $h = 0.49$; *д* – F_y for $h = 0.49$; *е* – F_z for $h = 0.49$

совокупность факторов – падающая характеристика силы резания (по Н.Н. Зореву) и минимум коэффициента трения, связанного с переходом трения от адгезионной к диффузионной природе, не является достаточной для обеспечения оптимальности системы резания по положению А.Д. Макарова. В первую очередь это объясняется отсутствием перестройки силовой реакции со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента при росте изношенности режущего клина по задней грани.

Проверка второй гипотезы

Коррекция математической модели системы управления резанием

Рассмотрим вторую гипотезу, выдвинутую в качестве обоснования научного положения А.Д. Макарова. Здесь важно отметить, что для этого необходимо дополнить математическую модель, описывающую реакцию системы резания на формообразующие движения инструмента, дополнительным элементом, отображающим зависимость выталкивающей силы F_h от температуры контакта инструмента и обрабатываемой детали. Это удобно интерпретировать через введение зависимости σ – предела прочности обрабатываемого металла при сжатии в [кг/мм^2] от соответствующей температуры контакта.

Для определения этой зависимости была проведена серия экспериментов с использованием экспериментальной установки STD.201-1, которая предполагает настройку весовых коэффициентов для расчета температуры резания по снимаемым значениям естественной термоЭДС. Установка STD.201-1 разработана американскими инженерами для решения задач анализа динамики процессов резания на станках токарной группы. Установка позволяет измерять силы и вибрации инструмента, разложенные вдоль осей деформации (см. рис. 1), а также температуру в зоне резания. Для этого в методике исследований предусмотрена целая процедура настройки, которая включает в себя двойное измерение температуры контакта, измерение при помощи естественной термоЭДС и измерения, проводимые рядом с контактом тарированной термопарой. Пример подключения для случая измерения влияния температуры контакта на выталкивающую силу для случая стали 45 показан на рис. 7.

Как видно из рис. 7, измерительная установка помимо стенда STD201-1 содержит специ-

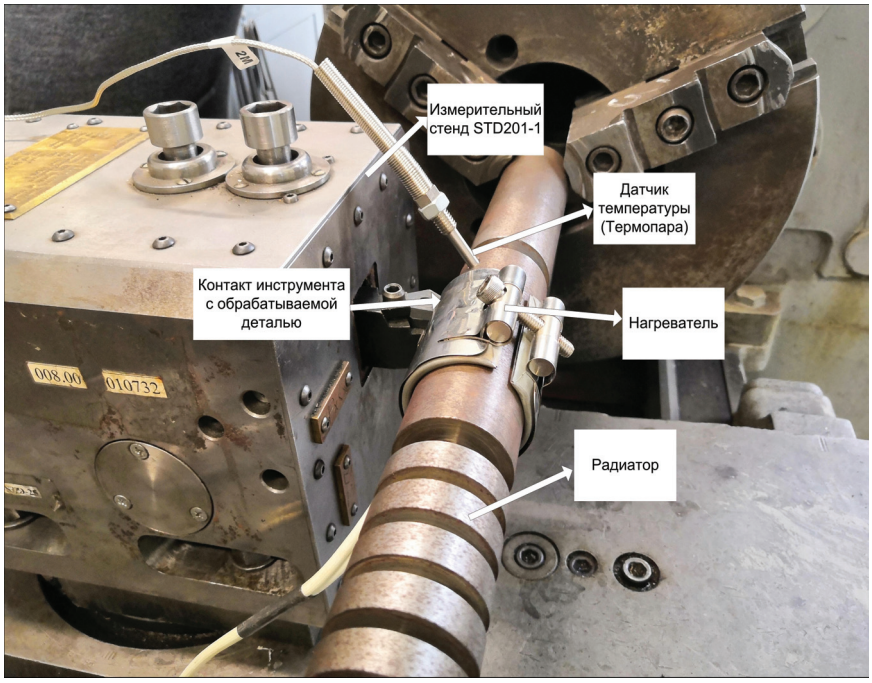


Рис. 7. Экспериментальная установка, подготовленная к оценке влияния температуры контакта на выталкивающую силу

Fig. 7. Experimental setup prepared to assess the effect of contact temperature on the buoyant force

ально подготовленный вал из стали 45, который имеет радиатор – рабочую зону, подогревом которой занимается специальный круговой нагреватель, одеваемый на вал. Помимо этого к валу с некоторым усилием подведен инструмент, рядом с контактом которого в материал вала вставлена термопара, измеряющая реальное значение температуры контакта.

Результаты измерений представлены программным интерфейсом системы, внешний вид которого представлен на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что интерфейс стенда STD201-1 предусматривает возможность калибровки измерительной подсистемы, основанной на измерении естественной термоЭДС зоны резания. Именно калибровочный режим этого измерительного стенда был использован для эксперимента по определению зависимости выталкивающей силы от температуры контакта инструмента и обрабатываемой детали.

Результаты экспериментов по оценке влияния температуры контакта на значение силы, выталкивающей инструмент из зоны резания, для случая обработки стали 45 приведены в табл. 2.

Графическое отображение результатов эксперимента, показано на рис. 9.

На рис. 9 показано, что выталкивающая сила почти линейно зависит от температуры контакта. Это вполне объяснимо с точки зрения линейного характера расширения металлов при росте их температуры. Усредненный коэффициент линейного увеличения выталкивающей силы при росте температуры контакта k_Q^F для случая стали 45 составил значение в 0.05 625.

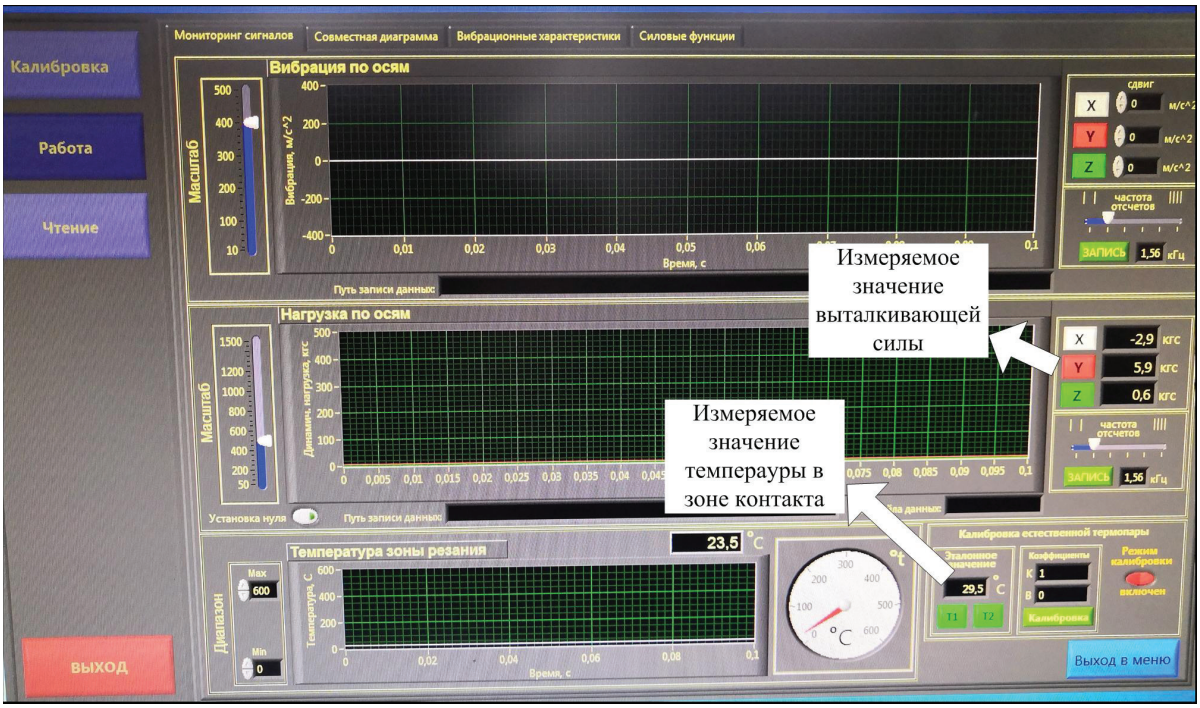


Рис. 8. Интерфейс стенда STD201-1

Fig. 8. Interface of the stand *STD201-1*

Таблица 2

Table 2

Зависимость F_y от температуры контакта

Dependence of F_y on the contact temperature

Q, °C	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
F_y, кгс	9.5	9.7	10.3	10.9	11.5	12.2	12.8	13.4	13.8	14.3	14.6

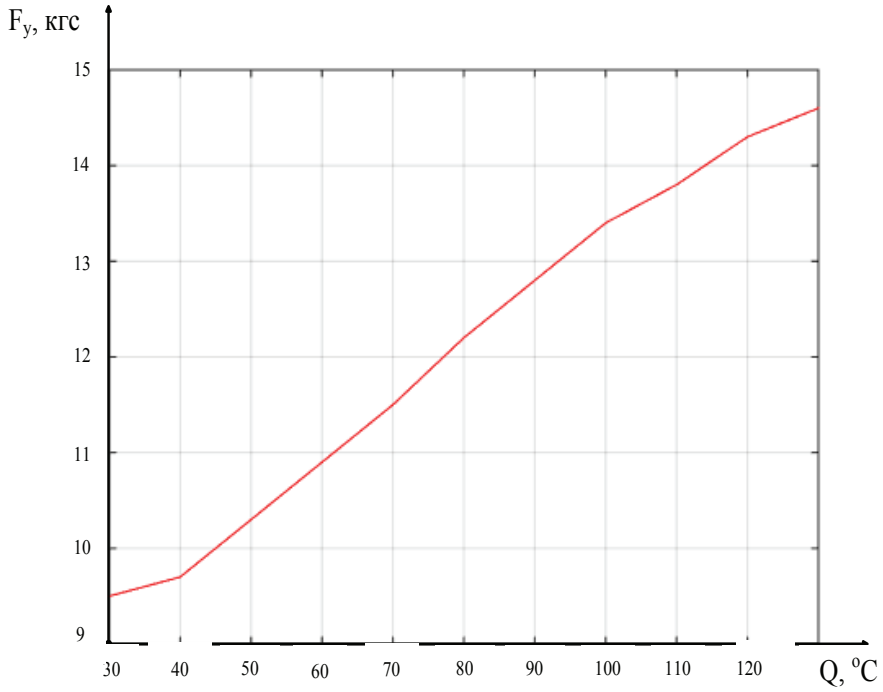


Рис. 9. Результаты эксперимента по стали 45

Fig. 9. Results of the experiment on steel 45

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что выталкивающая сила линейно зависит от температуры обрабатываемой детали, для стали 45 коэффициент усиления выталкивающей силы составил 0.05 625.

Представим зависимость силы резания от температурно-скоростного фактора резания в виде падающей экспоненциальной зависимости коэффициента ρ от реальной скорости резания, как это представлено в выражении

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \mu e^{-\alpha_1 \left(V_c - \frac{dz}{dt}\right)}\right), \qquad (17)$$

где ρ_0 – некоторое минимальное значение коэффициента ρ; μ – коэффициент, показывающий повышения значения ρ до некоторого максимального его значения; α_1 – коэффициент крутизны падения значения ρ; $\left(V_c - \frac{dz}{dt}\right)$ – мгновенная скорость резания.

С учетом выражения (17), а также на основании выражения (1) сила резания будет интерпретирована как

$$F = \rho_0 \left(1 + \mu e^{-\alpha_1 \left(V_c - \frac{dz}{dt}\right)}\right)(t_p - y) \times$$

$$\times \int_{t-T_v}^{t} \left(V_f - \frac{dx}{dt}\right) dt, \qquad (18)$$

где $(t_p - y)$ – мгновенная глубина резания; $\int_{t-T_v}^{t} \left(V_f - \frac{dx}{dt}\right) dt$ – реальная подача.

На основании преобразования подачи, представленного в выражении (18), получим выражение для расчета подачи в следующем виде:

$$\int_{t-T_v}^{t} \left(V_f - \frac{dx}{dt}\right) dt = V_f T_v - \left[x(t) - x(t - T_v)\right] =$$

$$= S_0 - x\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right), \qquad (19)$$

где S_0 – заданная программой ЧПУ технологическая подача на оборот, а $x\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)$ – преобразованное через звено запаздывания деформационное движение режущего инструмента вдоль оси подачи.

Выражение (18) с учетом (19) и будет описывать силу резания, которая после процедуры линеаризации в окрестности точки равновесия примет следующее значение:

$$\tilde{F} = -y\rho_0{}^{V_c}S_0 - x\left(1 - e^{-jT_v\omega}\right)\rho_0{}^{V_c}t_p +$$

$$+\frac{dz}{dt}\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0\,, \qquad (20)$$

где $\rho_0{}^{V_c} = \rho_0\left(1 + \mu(1 - \alpha_1 V_c)\right)$.

Рассмотрим на примере проведенных натурных экспериментов составляющую силы, которая зависит от износа инструмента по задней грани, описанную в выражении (2), которую, с учетом выявленной линейной зависимости, удобно рассматривать как

$$F_h = \left(\sigma_0 + k_Q^F Q_h\right)h_3(t_p - y)e^{-K_h x}\,, \qquad (21)$$

где σ_0 – предел прочности обрабатываемого металла при сжатии в [кг/мм^2], при температуре контакта по задней грани инструмента и обрабатываемой детали Q_h в ноль градусов.

Линеаризованное значение силы по задней грани в окрестности точки равновесия будет иметь следующий вид:

$$\tilde{F}_h = -xK_h\sigma_0 h_3 t_p - y\sigma_0 h_3 + Q_h k_Q^h h_3 t_p\,. \qquad (22)$$

В описании силы резания по координате z присутствует коэффициент трения, описываемый выражением (6), линеаризованный вариант этого коэффициента приведен ниже:

$$k_t = k_{0t} + \Delta k_t(1 - K_{f1}Q_h)\,/\,2 +$$

$$+\Delta k_t(1 + K_{f2}Q_h)\,/\,2\,. \qquad (23)$$

С учетом (22) и (23) линеаризованное значение $F_h^{(z)}$ в окрестности точки равновесия примет вид

$$\tilde{F}_h{}^z = -xK_h\sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) -$$

$$-y\sigma_0 h_3(k_{0t} + \Delta k_t) + Q_h\Big[k_Q^h h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) +$$

$$+\ (K_{f2} - K_{f1})\Delta k_t\sigma_0 h_3 t_p\Big]\,. \qquad (24)$$

Температуру контакта задней грани инструмента и обрабатываемой детали определим как решение следующего дифференциального уравнения:

$$T_1T_2\frac{d^2Q_h}{dt^2} + (T_1 + T_2)\frac{dQ_h}{dt} + Q_h =$$

$$= kN(t - T)\,, \qquad (25)$$

где

$$N(t - T_v) = \left(\chi_3 F(t - T_v) + F_h^{(z)}(t - T_v)\right)\times$$

$$\times\left(V_c - \frac{dz(t - T_v)}{dt}\right). \qquad (26)$$

После раскрытия выражение (26) примет вид

$$N(t - T_v) = \chi_3 F(t - T_v)V_c + F_h^{(z)}(t - T_v)V -$$

$$-\chi_3 F(t - T_v)\frac{dz(t - T_v)}{dt} -$$

$$-F_h^{(z)}(t - T_v)\frac{dz(t - T_v)}{dt}\,. \qquad (27)$$

Линеаризованное в окрестности точки равновесия значение мощности необратимых преобразований примет следующий вид:

$$N(t - T_v) = -y\chi_3 e^{-jT_v\omega}\rho_0{}^{V_c}S_0V_c -$$

$$-x\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})e^{-jT_v\omega}\rho_0{}^{V_c}t_pV_c +$$

$$+\frac{dz}{dt}e^{-jT_v\omega}\chi_3\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0V -$$

$$-xK_h\sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)e^{-jT_v\omega}V -$$

$$-\,y\sigma_0 h_3(k_{0t} + \Delta k_t)e^{-jT_v\omega}V_c +$$

$$+\ Q_h\Big[k_Q^h h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) +$$

$$+(K_{f2} - K_{f1})\Delta k_t\sigma_0 h_3 t_p\Big]e^{-jT_v\omega}V_c - \frac{dz}{dt}\times$$

$$\times\Big[\chi_3\rho_0{}^{V_c}S_0 + \sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)\Big]e^{-jT_v\omega}\,. \qquad (28)$$

Общая система уравнений, описывающих динамику системы резания, приведена ниже:

$$
\begin{cases}
F = \rho_0 \left(1 + \mu e^{-\alpha_1\left(V_c - \frac{dz}{dt}\right)}\right)(t_p - y) \int\limits_{t-T_v}^{t} \left(V_f - \frac{dx}{dt}\right) dt, \\
m\frac{d^2x}{dt^2} + h_{11}\frac{dx}{dt} + h_{12}\frac{dy}{dt} + h_{13}\frac{dz}{dt} + c_{11}x + c_{12}y + c_{13}z = F_f, \\
m\frac{d^2y}{dt^2} + h_{21}\frac{dx}{dt} + h_{22}\frac{dy}{dt} + h_{23}\frac{dz}{dt} + c_{21}x + c_{22}y + c_{23}z = F_p, \\
m\frac{d^2z}{dt^2} + h_{31}\frac{dx}{dt} + h_{32}\frac{dy}{dt} + h_{33}\frac{dz}{dt} + c_{31}x + c_{32}y + c_{33}z = F_c, \\
F_f = \chi_1 F + F_h^{(x)}, \\
F_p = \chi_2 F + F_h^{(y)}, \\
F_c = \chi_3 F + F_h^{(z)}, \\
F_h = \left(\sigma_0 + k_Q^F Q_h\right) h_3 t_p e^{-K_h x}, \\
F_h^{(x)} = \cos\varphi F_h, \\
F_h^{(y)} = \sin\varphi F_h, \\
F_h^{(z)} = k_t F_h, \\
k_t = k_{0t} + \Delta k_t \left[e^{-K_{f1}Q_z} + e^{K_{f2}Q_z}\right] / 2, \\
T_1 T_2 \frac{d^2 Q_h}{dt^2} + (T_1 + T_2)\frac{dQ_h}{dt} + Q_h = kN(t - T_v), \\
N(t - T_v) = \left(\chi_3 F(t - T_v) + F_h^{(z)}(t - T_v)\right)\left(V_c - \frac{dz(t - T_v)}{dt}\right).
\end{cases}
\tag{29}
$$

Эта же система, но уже в линеаризованном виде в окрестности точки равновесия и после перехода к операторной форме записи примет следующий вид:

$$
\begin{cases}
x(p)\left(mp^2 + h_{11}p + \chi_1(1-e^{-jT_v\omega})\rho_0^{V_c}t_p + \cos(\varphi)K_h\sigma_0 h_3 t_p + c_{11}\right) + \\
+y(p)\left(h_{12}p + \chi_1\rho_0^{V_c}S_0 + \cos(\varphi)\sigma_0 h_3 + c_{12}\right) + \\
+z(p)\left(h_{13}p - p\chi_1\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 + c_{13}\right) - Q_h(p)\cos(\varphi)k_Q^h h_3 t_p = 0, \\
x(p)\left(h_{21}p + \chi_2(1-e^{-jT_v\omega})\rho_0^{V_c}t_p + \sin(\varphi)K_h\sigma_0 h_3 t_p + c_{21}\right) + \\
+y(p)\left(mp^2 + h_{22}p + \chi_2\rho_0^{V_c}S_0 + \sin(\varphi)\sigma_0 h_3 + c_{22}\right) + \\
+z(p)\left(h_{23}p - p\chi_2\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 + c_{23}\right) - Q_h(p)\sin(\varphi)k_Q^h h_3 t_p = 0, \\
x(p)\left(h_{31}p + \chi_3\left(1-e^{-jT_v\omega}\right)\rho_0^{V_c}t_p + c_{31} + K_h\sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)\right) + \\
+y(p)\left(h_{32}p + \chi_3\rho_0^{V_c}S_0 + c_{32} + \sigma_0 h_3(k_{0t} + \Delta k_t)\right) + \\
+z(p)\left(mp^2 + h_{33}p - p\chi_3\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 + c_{23}\right) - \\
-Q_h(p)\left[k_Q^h h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) + (K_{f2} - K_{f1})\Delta k_t\sigma_0 h_3 t_p\right] = 0, \\
x(p)k\left[\chi_3(1-e^{-jT_v\omega})e^{-jT_v\omega}\rho_0{}^{V_c}t_p V_c + K_h\sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)e^{-jT_v\omega}V_c\right] + \\
+y(p)k\left[\chi_3 e^{-jT_v\omega}\rho_0{}^{V_c}S_0 V_c + \sigma_0 h_3(k_{0t} + \Delta k_t)e^{-jT_v\omega}V\right] + \\
+z(p)kp\left[\left(\chi_3\rho_0{}^{V_c}S_0 + \sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)\right)e^{-jT_v\omega} - e^{-jT_v\omega}\chi_3\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 V\right] + \\
+Q_h(p)\left[T_1T_2p^2 + (T_1 + T_2)p + 1 - \right. \\
\left. -k\left(k_Q^h h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) + (K_{f2} - K_{f1})\Delta k_t\sigma_0 h_3 t_p\right)e^{-jT_v\omega}V_c\right] = 0,
\end{cases}
\tag{30}
$$

где p – оператор преобразования Лапласа, который при нулевых начальных условиях равен $p = \dfrac{d}{dt}$.

Система (30) в матрично-векторном виде приведена ниже:

$$
\begin{cases}
a_{11}(p)x(p) + a_{12}(p)y(p) + a_{13}(p)z(p) + a_{14}(p)Q_h(p) = 0, \\
a_{21}(p)x(p) + a_{22}(p)y(p) + a_{23}(p)z(p) + a_{24}(p)Q_h(p) = 0, \\
a_{31}(p)x(p) + a_{32}(p)y(p) + a_{33}(p)z(p) + a_{34}(p)Q_h(p) = 0, \\
a_{41}(p)x(p) + a_{42}(p)y(p) + a_{43}(p)z(p) + a_{44}(p)Q_h(p) = 0,
\end{cases},
\tag{31}
$$

где коэффициенты матрицы

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}(p) & a_{12}(p) & a_{13}(p) & a_{14}(p) \\ a_{21}(p) & a_{22}(p) & a_{23}(p) & a_{24}(p) \\ a_{31}(p) & a_{32}(p) & a_{33}(p) & a_{34}(p) \\ a_{41}(p) & a_{42}(p) & a_{43}(p) & a_{44}(p) \end{pmatrix}, \tag{32}$$

a_{ij} , $i = 1...4, j = 1...4$, представлены следующими выражениями:

$$\begin{cases} a_{11}(p) = mp^2 + h_{11}p + \chi_1(1 - e^{-jT_v\omega})\rho_0^{V_c} t_p + \cos(\varphi)K_h\sigma_0 h_3 t_p + c_{11}, \\ a_{12}(p) = h_{12}p + \chi_1\rho_0^{V_c} S_0 + \cos(\varphi)\sigma_0 h_3 + c_{12}, \\ a_{13}(p) = h_{13}p - p\chi_1\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 + c_{13}), \\ a_{14}(p) = \cos(\varphi)k_Q^h h_3 t_p, \\ a_{21}(p) = h_{21}p + \chi_2(1 - e^{-jT_v\omega})\rho_0^{V_c} t_p + \sin(\varphi)K_h\sigma_0 h_3 t_p + c_{21}, \\ a_{22}(p) = mp^2 + h_{22}p + \chi_2\rho_0^{V_c} S_0 + \sin(\varphi)\sigma_0 h_3 + c_{22}, \\ a_{23}(p) = h_{23}p - p\chi_2\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 + c_{23}, \\ a_{24}(p) = \sin(\varphi)k_Q^h h_3 t_p, \\ a_{31}(p) = h_{31}p + \chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})\rho_0^{V_c} t_p + c_{31} + K_h\sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t), \\ a_{32}(p) = h_{32}p + \chi_3\rho_0^{V_c} S_0 + c_{32} + \sigma_0 h_3(k_{0t} + \Delta k_t), \\ a_{33}(p) = mp^2 + h_{33}p - p\chi_3\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 + c_{23}, \\ a_{34}(p) = k_Q^h h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) + (K_{f2} - K_{f1})\Delta k_t\sigma_0 h_3 t_p, \\ a_{41}(p) = k\left[\chi_3(1 - e^{-jT_v\omega})e^{-jT_v\omega}\rho_0{}^{V_c} t_p V_c + K_h\sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)e^{-jT_v\omega}V\right], \\ a_{42}(p) = k\left[\chi_3 e^{-jT_v\omega}\rho_0{}^{V_c} S_0 V_c + \sigma_0 h_3(k_{0t} + \Delta k_t)e^{-jT_v\omega}V\right], \\ a_{43}(p) = kp\left[\left(\chi_3\rho_0{}^{V_c} S_0 + \sigma_0 h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t)\right)e^{-jT_v\omega} - e^{-jT_v\omega}\chi_3\rho_0\mu\alpha_1 t_p S_0 V_c\right], \\ a_{44}(p) = T_1T_2p^2 + (T_1 + T_2)p + 1 - k\left(k_Q^h h_3 t_p(k_{0t} + \Delta k_t) + \right. \\ \left. +(K_{f2} - K_{f1})\Delta k_t\sigma_0 h_3 t_p\right)e^{-jT_v\omega}V_c. \end{cases} \tag{33}$$

Аналогично рассуждениям предыдущего раздела в последующем необходимо перейти во временну́ю область, проведя замену $p = j\omega$, а характеристический полином системы управления не что иное, как определитель матрицы A, т. е. следующее выражение:

$$D(j\omega) = \det\left(A(j\omega)\right) =$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11}(j\omega) & a_{12}(j\omega) & a_{13}(j\omega) & a_{14}(j\omega) \\ a_{21}(j\omega) & a_{22}(j\omega) & a_{23}(j\omega) & a_{24}(j\omega) \\ a_{31}(j\omega) & a_{32}(j\omega) & a_{33}(j\omega) & a_{34}(j\omega) \\ a_{41}(j\omega) & a_{42}(j\omega) & a_{43}(j\omega) & a_{44}(j\omega) \end{vmatrix}. \quad (34)$$

Таким образом, выражение (34) – вектор Михайлова, который нужно исследовать на поведение на комплексной плоскости при изменении частоты ω от нуля до бесконечности.

Результаты моделирования и обсуждение второй гипотезы

Для адекватного сравнения результатов экспериментов в предыдущем разделе и удобства представления поведения системы моделирование проводилось аналогично предыдущему варианту в пакете Matlab/Simulink 2014, где в Simulink напрямую моделировалась система (29), а вектор Михайлова (34) рассчитывался циклом в самом Matlab, где на каждом шаге цикла считался определитель $D(j\omega)$ для конкретного значения частоты ω, и полученное значение откладывалось на комплексную плоскость, затем все повторялось. В целом рассчитывалось значение $D(j\omega)$ для ω от нуля до 4400 Гц с шагом 0.01 Гц. Результаты моделирования для случая обработки со скоростью резания 900 оборотов в минуту приведены ниже.

Рассмотрим динамику нелинейной системы резания при скорости резания в 900 оборотов в минуту и h = 0.24 мм, график координат деформационного движения вершины инструмента и соответствующие им фазовые траектории показаны на рис. 10.

Динамика процесса резания, отраженная в рис. 10, показывает устойчивый процесс обработки, который связан с минимизацией вибрационной активности инструмента. Запас устойчивости можно оценить по точке начала годографа вектора Михайлова на комплексной плоскости, который показан на рис. 11.

Как видно из рис. 11, запас устойчивости зависит от расстояния кривой начала годографа от начала координат комплексной плоскости. Вторая часть графика годографа не информативна, так как потеря устойчивости отображается в начале годографа. Исходя из этих соображений в дальнейшем вторая часть (окончание годографа) приводиться не будет.

Рассмотрим анализ устойчивости системы управления резанием при износе в 0.36 мм, результаты моделирования годографа вектора Михайлова представлены на рис. 12.

На рис. 12 показано, что начало годографа вектора Михайлова по-прежнему далеко от начала координат, но здесь ярко проявляется регенеративный эффект, который в линеаризованной системе уравнений описывается оператором запаздывания $e^{-jT_v\omega}$. Влияние этого оператора на начальном участке при увеличении скорости резания становится более значительным, что приводит к увеличению колебаний годографа вектора Михайлова на начальном отрезке характеристики. В результате такого изменения характеристики годографа вектора Михайлова потеря устойчивости может быть связана с его вхождением во второй квадрант и последующим возвращением в первый квадрант. Точка, где годограф наиболее приближен ко второму квадранту (точка сближения на графике), и будет определять запас устойчивости системы резания. Из рис. 12 видно, что годограф вектора Михайлова резанием действительно выходит из первого квадранта по причине влияния на него оператора запаздывания. Рассмотрим более приближенно эту точку на рис. 12 справа, откуда видно, что механизм отражения потери устойчивости в системе резания на годографе вектора Михайлова связан с пересечением годографом мнимой оси в направлении второго квадранта комплексной плоскости. Такое изменение в поведении годографа связано с возрастанием эффекта самовозбуждения системы резания, который в англоязычной научной литературе и принято называть регенеративным эффектом.

Для дальнейшего анализа системы управления резанием сформируем в одну таблицу все полученные в этой части работы данные о верх-

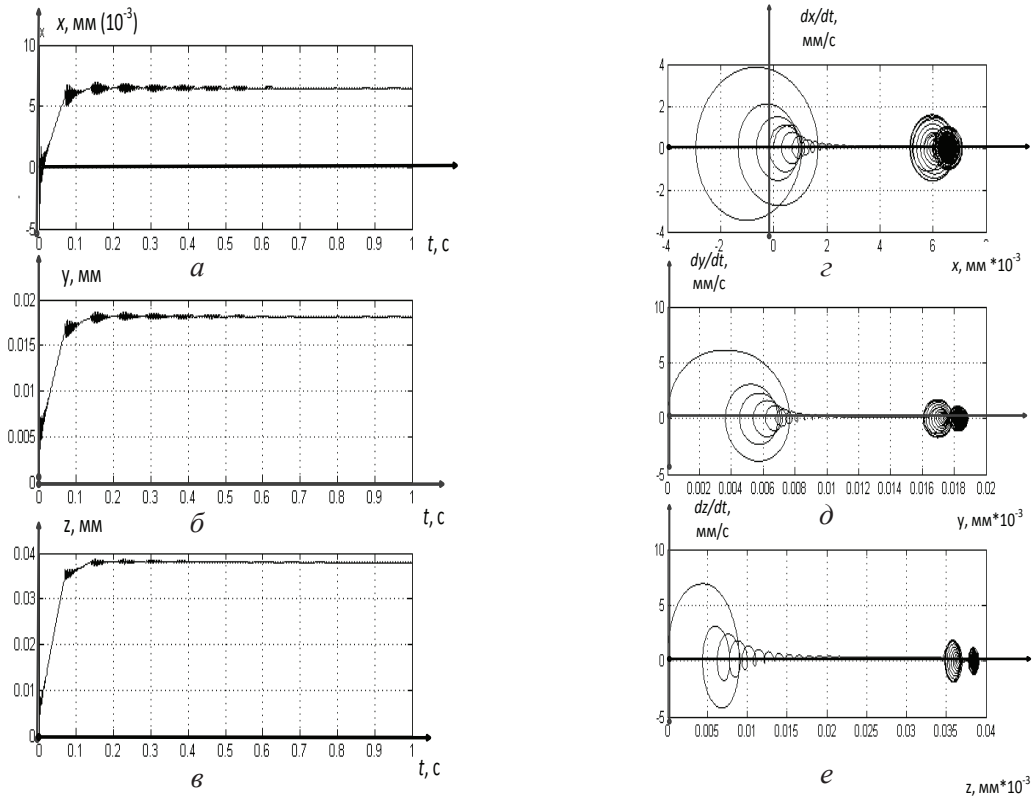


Рис. 10. Для случая износа $h = 0.24$:

а – деформации по координате *x*; *б* – деформации по координате *y*; *в* – деформации по координате *z*; *г* – фазовая траектория по координате *x; д* – фазовая траектория по координате *y*; *е* – фазовая траектория, вдоль *z*-координаты

Fig. 10. For the case of wear $h = 0.24$:

a – deformations along the *x* coordinate; *б* – deformations along the *y* coordinate; *в* – deformations along the *z* coordinate; *г* – phase trajectory along the *x* coordinate; *д* – phase trajectory along the *y* coordinate; *e* – phase trajectory along the *z* coordinate

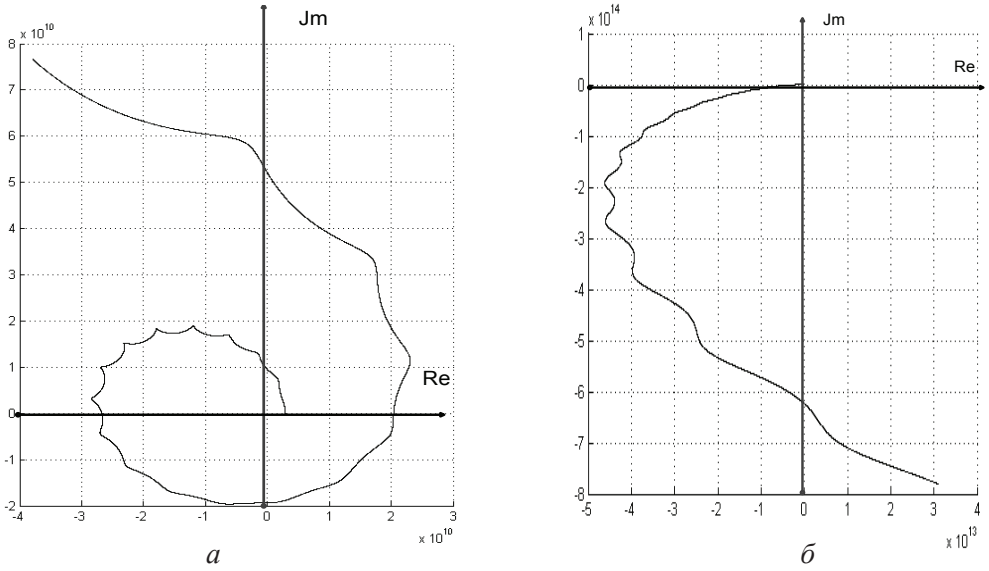


Рис. 11. Годограф вектора Михайлова, система с $h = 0.24$:

а – начало вектора Михайлова; *б* – окончание вектора Михайлова

Fig. 11. The hodograph of the *Mikhailov* vector, a system with $h = 0.24$:

a – the beginning of the *Mikhailov* vector; *б* – the end of the *Mikhailov* vector

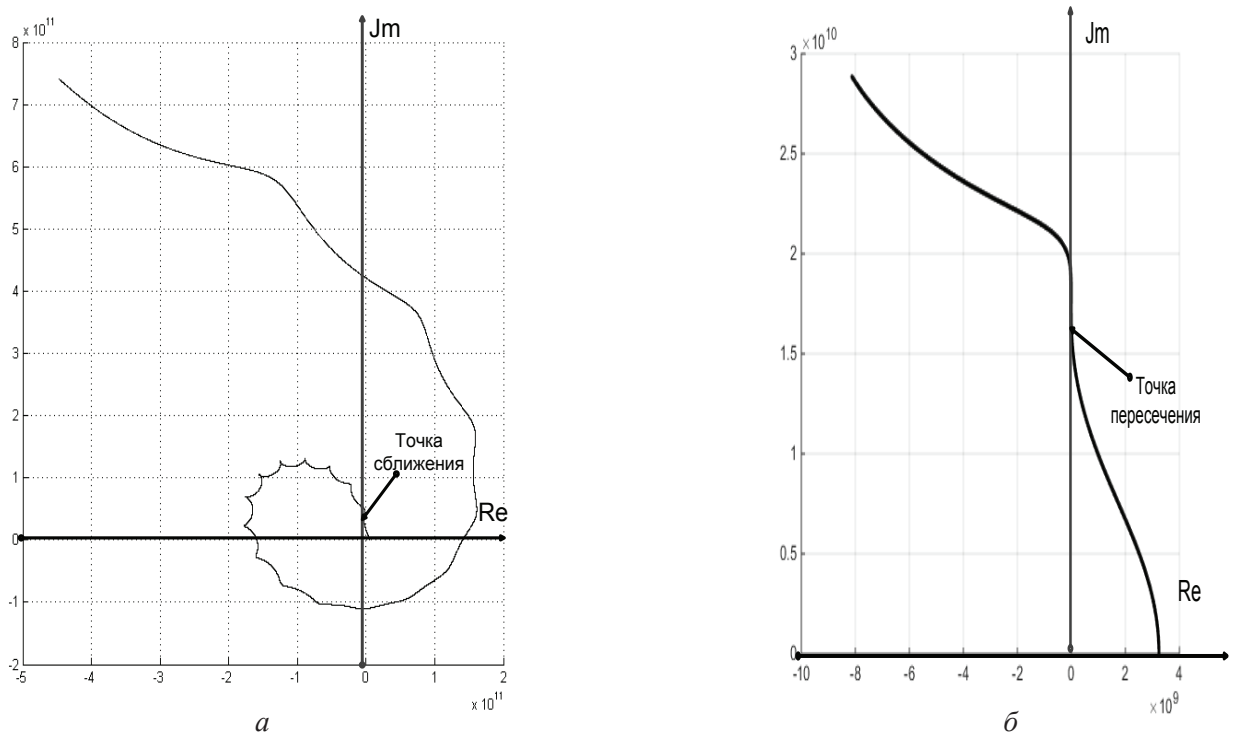


Рис. 12. Годограф вектора Михайлова, система с $h = 0.36$:

а – начало вектора Михайлова; *б* – увеличенное начало годографа вектора Михайлова

Fig. 12. The *Mikhailov* vector hodograph, a system with $h = 0.36$:

a – the beginning of the *Mikhailov* vector; *б* – the enlarged beginning of the *Mikhailov* vector hodograph

ней границе устойчивости системы управления резанием по критерию Михайлова (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что максимум области устойчивости системы управления резанием в пространстве параметров скорости резания и величины износа режущего клина наблюдается при скорости резания в 1620 оборотов в минуту. В этой точке величина допустимого с точки зрения обеспечения устойчивости процесса обработки износа составила 0.47 мм, что существенно выше среднего значения по выборке, которое равно $h \approx 0.39$ мм.

Графически интерпретация данных, приведенных в табл. 3, представлена на рис. 13.

На рис. 13 показано, что область устойчивой динамики системы резания действительно имеет ярко выраженный локальный максимум на скорости резания в 1620 оборотов в минуту. Здесь надо отметить, что исследования, проведенные в предыдущей части работы, такого сильного максимума не дали (см. рис. 5).

Для проверки выдвинутого предположения о значимом влиянии перестройки силовой реакции со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента рассмотрим силы при тех же скоростях обработки, что и в предыдущем случае.

Таблица 3

Table 3

Граница устойчивости системы резания

The boundary of stability of the cutting system

h_3(мм)	0.3	0.31	0.32	0.33	0.335	0.342	0.351	0.36	0.375	0.386
n(об/мин)	360	460	660	760	820	900	1000	1100	1200	1300
h_3(мм)	0.397	0.41	0.43	0.46	0.47	0.44	0.43	0.42	0.418	0.41
n(об/мин)	1400	1500	1560	1600	1620	1680	1700	1750	1800	1900

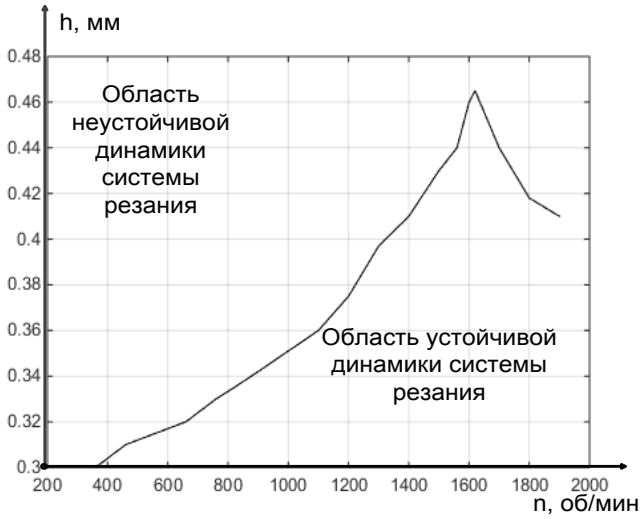


Рис. 13. Области устойчивого и неустойчивого поведения системы резания

Fig. 13. Areas of stable and unstable behavior of the cutting system

Как видно из рис. 14, при росте величины изношенности режущего клина инструмента происходит существенная перестройка силовой реакции системы резания, составляющая F_x увеличивается на 5 %, составляющая F_y увеличивается на 32 %, а F_z – на 14 %.

Таким образом, исследования показали, что именно рост выталкивающей силы при неизбежном росте скорости обработки, росте температуры контакта приводит к перестройке силовой реакции и ограничению области устойчивости системы резания справа от локального минимума.

Выводы

Исследования показали, что поставленная в работе первая гипотеза не позволяет адекватно отобразить положение А.Д. Макарова о суще-

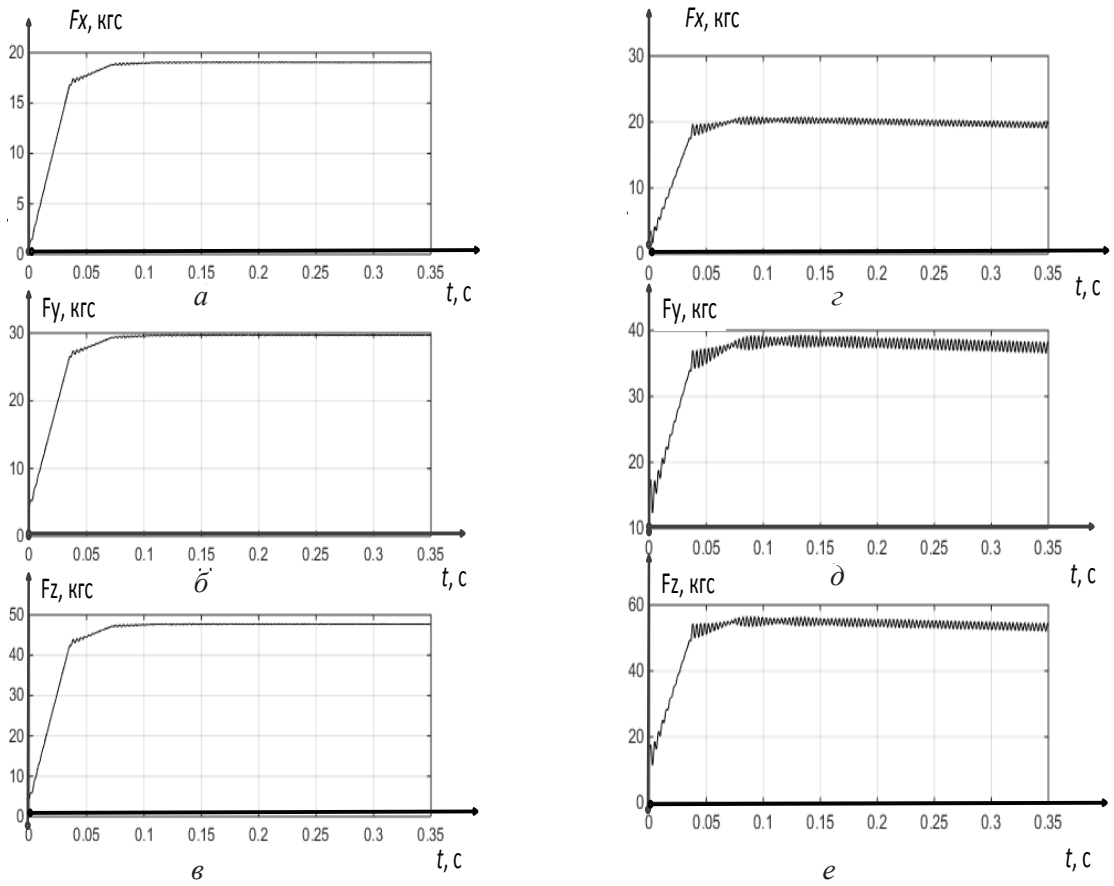


Рис. 14. Силы реакции для варианта со скорость резания в 1 600 об/мин:
а – F_x для $h = 0.11$; *б* – F_y для $h = 0.11$; *в* – F_z для $h = 0.11$; *г* – F_x для $h = 0.41$; *д* – F_y для $h = 0.41$; *е* – F_z для $h = 0.41$.

Fig. 14. Reaction forces for the option with a processing speed of 1 600 rpm:
а – F_x for $h = 0.11$; *б* – F_y for $h = 0.11$; *в* – F_z for $h = 0.11$; *г* – F_x for $h = 0.41$; *д* – F_y for $h = 0.41$; *е* – F_z for $h = 0.41$

ствовании некоторого оптимального режима обработки, а вот вторая гипотеза в целом подтверждает это положение. Действительно, оптимальное значение скорости резания (температуры резания) при моделировании динамики процесса обработки определяется совокупностью следующих факторов: падающей характеристикой силы резания (по Н.Н. Зореву), минимумом коэффициента трения, вызванного переходом трения от адгезионной к диффузионной природе и зависимостью выталкивающей инструмент силы от предварительного прогрева зоны обработки. Однако здесь надо добавить, что еще одним важным фактором, определяющим оптимальность, по Макарову А.Д., процесса обработки, является регенеративный эффект, присущий модели системы управления резания, который оказывает существенное влияние на устойчивость динамики системы резания.

Все это позволяет сформулировать следующее научное положение: оптимальным с точки зрения скорости резания (температуры резания) будет режим, при котором падающая характеристика силы резания (по Н.Н. Зореву) достигнет своего минимального значения, коэффициент трения на задней грани инструмента будет находиться в некоторой окрестности точки локального минимума, выталкивающая инструмент сила не будет превышать некоторого заранее известного значения, и при этом значение скорости резания должно быть в окрестности некоторого минимума самовозбуждения системы резания при регенерации колебаний из-за резания «по следу».

С практической точки зрения проведенные исследования показывают возможность внедрения новых измерительных и вычислительных подсистем, которые на базе синтезированной математической модели могут в режиме реального времени определять наиболее оптимальные режимы резания.

Список литературы

1. *Stépán G.* Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting // Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359. – P. 739–757. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0753.

2. *Litak G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // Chaos, Solitons and Fractals. – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

3. *Namachchivaya S., Beddini R.* Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter // Journal of Nonlinear Science. – 2003. – Vol. 13. – P. 265–288. – DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.

4. *Wahi P., Chatterjee A.* Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales // Nonlinear Dynamics. – 2005. – Vol. 40, iss. 4. – P. 323–338.

5. *Stépán G., Insperger T., Szalai R.* Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2005. – Vol. 15, N 09. – P. 2783–2798. – DOI: 10.1142/S0218127405013642.

6. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis / H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45, iss. 8. – P. 1050–1066. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

7. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gouskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2002. – Vol. 7, N 4. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.

8. *Lapshin V.P.* Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system // Materials. – 2021. – Vol. 14, N 21. – P. 6492. – DOI: 10.3390/ma14216492.

9. *Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В.* Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.

10. *Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E.* Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39, N 5. – P. 423–430. – DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

11. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Связь притягивающих множеств деформаций инструмента с пространственной ориентацией упругости и регенерацией сил резания при точении // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2022. – Т. 30, № 1. – С. 37–56. – DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56.

12. *Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E.* Self-organization and evolution in dynamic friction systems // Journal of Vibroengineering. – 2021. – Vol. 23, iss. 6. – P. 1418–1432. – DOI: 10.21595/jve.2021.22033.

13. *Astakhov V.P.* The assessment of cutting tool wear // International Journal of Machine Tools

and Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – P. 637–647. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006.

14. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект). – Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2004. – 323 с. – ISBN 5-7890-0307-9.

15. Analyzing the stability of the FDTD technique by combining the von Neumann method with the Routh-Hurwitz criterion / J.A. Pereda, L.A. Vielva, A. Vegas, A. Prieto // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49 (2). – P. 377–381.

16. *Kolev L., Petrakieva S.* Interval Raus criterion for stability analysis of linear systems with dependent coefficients in the characteristic polynomial // 27th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress. – IEEE, 2004. – Vol. 1. – P. 130–135.

17. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28, вып. 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

18. The approach to investigation of the the regions of self-oscillations / T.R. Velieva, D.S. Kulyabov, A.V. Korolkova, I.S. Zaryadov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 937. – P. 012057. – DOI: 10.1088/1742-6596/937/1/012057.

19. *Sourdille P., O'Dwyer A., Coyle E.* Smith predictor structure stability analysis using Mikhailov stability criterion // Proceedings of the 4th Wismarer Automatisierungs Symposium. – Wismar, Germany, 2005. – P. 22–23. – DOI: 10.21427/kp1b-6034.

20. *Saleh A.I., Hasan M.M.M., Darwish N.M.M.* The Mikhailov stability criterion revisited // JES. Journal of Engineering Sciences. – 2010. – Vol. 38, N 1. – P. 195–207.

21. *Barker L.K.* Mikhailov stability criterion for time-delayed systems. Report NASA-TM-78803. – NASA Langley Research Center, 1979. – 17 p.

22. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

23. *Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Климов М.М.* Обработка материалов резанием. – Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 418 с. – ISBN 978-5-7890-0413-X.

24. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 16–43
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Determination of the optimal metal processing mode when analyzing the dynamics of cutting control systems

Victor Lapshin [a, *], *Denis Moiseev* [b]

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-5114-0316, lapshin1917@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-7186-7758, denisey2003@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 December 2022
Revised: 12 January 2023
Accepted: 21 January 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Dynamics
Tool vibration
Cutting stability
Processing speed
Wear and tear
Regenerative effect

Acknowledgements
Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. In numerous experimental studies of metal cutting processes on metal-cutting equipment, the existence of some optimal processing mode is noted, which was most vividly formulated by *A.D. Makarov* in his point on the existence of an optimal cutting temperature (processing speed). Here, by the authors from Russia, the emphasis is on the description of the optimality of cutting processes related to the properties of the processed material and the properties of the tool used in this process. However, there is another opinion in the Western scientific literature, which is generally based on the regenerative nature of vibrations in cutting dynamics. Vibration regeneration is associated with the dynamics of the cutting process, which is significantly affected by a lagging argument reflecting the variability of the cut layer. The connection of these two approaches is seen through the analysis of the stability domain of the dynamic cutting system in the parameter space: cutting speeds and tool wear values. **Subject**. Based on this, the paper considers the question of the relationship between the optimal according to *A.D. Makarov* the processing mode and the dynamics of the cutting process, including the regeneration of tool vibrations during metal turning. To do this, two research hypotheses are formulated and numerical modeling is performed in order to determine its reliability. **Purpose of the work**: to consider the position of *A.D. Makarov* on the existence of an optimal cutting mode, from the point of view of the stability of the dynamics of metal turning. For this purpose, two hypotheses are put forward in the work to be analyzed. **The paper investigates**: a mathematical model describing the dynamics of vibration oscillations of the cutting wedge tip, taking into account the dynamics of the temperature formed in the contact zone and its influence on the forces that prevent the forming motions of the tool. **Research methods**: a series of field experiments was carried out on a metalworking equipment using the capabilities of the measuring stand *STD.201-1*, the purpose of which was to determine the effect of the thermal expansion of metals on the value of the buoyant force. Based on numerical simulation of the initial nonlinear mathematical models, as well as simulation of models linearized in the vicinity of the equilibrium point, an analysis of the stability of the cutting system with variations in the cutting speed and the amount of tool wear along the flank is conducted. **The results of the work**. The results of field experiments are presented, which showed a significant linear increase in the force pushing out the tool with an increase in temperature in the contact zone of the tool and the workpiece. The results of simulation of the state and the corresponding phase trajectories when the cutting wedge is embedded in the workpiece, as well as the forces decomposed along the axis of deformation of the tool, are presented. The results of modeling the *Mikhailov* vector hodograph for a linearized model of the dynamics of the cutting process are presented. **Conclusions**: The research results have shown that only the second hypothesis put forward by the authors makes it possible to adequately interpret the point put forward by *A.D. Makarov*. The main addition to the description of the point of *A.D. Makarov*, the authors consider it necessary to take into account changes in the pushing force with an increase in the temperature of the contact zone of the tool and the workpiece.

For citation: Lapshin V.P., Moiseev D.V. Determination of the optimal metal processing mode when analyzing the dynamics of cutting control systems. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 16–43. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43. (In Russian).

*** Corresponding author**
Lapshin Viktor P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Don State Technical University,
1 Gagarin square
344000, Rostov-on-don, Russian Federation
Tel.: 8 (900) 122-75-14, **e-mail:** lapshin1917@yandex.ru

References

1. Stépán G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359, pp. 739–757. DOI: 10.1098/rsta.2000.0753.

2. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2002, vol. 13, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

3. Namachchivaya S., Beddini R. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Nonlinear Science*, 2003, vol. 13, pp. 265–288. DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.

4. Wahi P., Chatterjee A. Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales. *Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 40, iss. 4, pp. 323–338.

5. Stépán G., Insperger T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 09, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.

6. Moradi H., Bakhtiari-Nejad F., Movahhedy M.R., Ahmadian M.T. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, vol. 45, iss. 8, pp. 1050–1066. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

7. Gouskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, vol. 7, no. 4, pp. 207–221. DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.

8. Lapshin V.P. Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, p. 6492. DOI: 10.3390/ma14216492.

9. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibration in metal turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.

10. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 5, pp. 423–430. DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

11. Zakovorotny V.L., Gvinjiliya V.E. Svyaz' prityagivayushchikh mnozhestv deformatsii instrumenta s prostranstvennoi orientatsiei uprugosti i regeneratsiei sil rezaniya pri tochenii [Correlation of attracting sets of tool deformations with spatial orientation of tool elasticity and regeneration of cutting forces in turning]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30 (1), pp. 37–56. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56.

12. Zakovorotny V.L., Gvinjiliya V.E. Self-organization and evolution in dynamic friction systems. *Journal of Vibroengineering*, 2021, vol. 23, iss. 6, pp. 1418–1432. DOI: 10.21595/jve.2021.22033.

13. Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 637–647. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006.

14. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh rezhushchikh materialov (triboelektricheskii aspekt)* [Synergetics of wear of tool cutting materials (triboelectric aspect)]. Rostov-on-Don, DSTU Publ., 2004. 323 p. ISBN 5-7890-0307-9.

15. Pereda J.A., Vielva L.A., Vegas A., Prieto A. Analyzing the stability of the FDTD technique by combining the von Neumann method with the Routh-Hurwitz criterion. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, vol. 49 (2), pp. 377–381.

16. Kolev L., Petrakieva S. Interval Raus criterion for stability analysis of linear systems with dependent coefficients in the characteristic polynomial. *27th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress*. IEEE, 2004, vol. 1, pp. 130–135.

17. Zakovorotny V.L., Gvinjiliya V.E. Svyaz' samoorganizatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya s iznashivaniem instrumenta [Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

18. Velieva T.R., Kulyabov D.S., Korolkova A.V., Zaryadov I.S. The approach to investigation of the the regions of self-oscillations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 937, p. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/937/1/012057.

19. Sourdille P., O'Dwyer A., Coyle E. Smith predictor structure stability analysis using Mikhailov stability criterion. *Proceedings of the 4th Wismarer Automatisierungs Symposium*, Wismar, Germany, 2005, pp. 22–23. DOI: 10.21427/kp1b-6034.

20. Saleh A.I., Hasan M.M.M., Darwish N.M.M. The Mikhailov stability criterion revisited. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 2010, vol. 38, no. 1, pp. 195–207.

21. Barker L.K. *Mikhailov stability criterion for time-delayed systems*. Report NASA-TM-78803. NASA Langley Research Center, 1979. 17 p.

22. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

23. Ryzhkin A.A., Shuchev K.G., Klimov M.M. *Obrabotka materialov rezaniem* [Processing of materials by cutting]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2008. 418 p. ISBN 978-5-7890-0413-X.

24. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Questions of mechanics of metal cutting process]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 367 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 44–56
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Экспериментальное исследование динамики процесса механообработки концевыми сфероцилиндрическими фрезами

Михаил Гимадеев [a,*], *Андрей Ли* [b], *Вера Беркун* [c], *Вадим Стельмаков* [d]

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, 680035, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-6685-519X, 009063@pnu.edu.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-9907-4936, 011864@pnu.edu.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-5249-2612, 2015103121@pnu.edu.ru, [d] https://orcid.org/0000-0003-2763-1956, 009062@pnu.edu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914:517.443:53.082.4

История статьи:
Поступила: 07 ноября 2022
Рецензирование: 14 января 2023
Принята к печати: 21 января 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Сфероцилиндрическая фреза
Шероховатость поверхности
Вибрация
Корреляционный анализ
Регрессионный анализ
Онлайн–мониторинг
Наклон инструмента

Финансирование:
Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Хабаровского края в рамках краевого конкурса на предоставление грантов в форме субсидий из краевого бюджета на реализацию проектов в области фундаментальных, технических, гуманитарных и общественных наук. Грант № 93С/2022 на тему «Повышение эффективности работы технологического оборудования при механообработке за счет онлайн-мониторинга акустического сигнала».

Благодарности:
Авторы выражают благодарность А.В. Никитенко, кандидату технических наук, доценту кафедры технологическая информатика и информационные системы (ФГБОУ ВО ТОГУ, г. Хабаровск) за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований в учебно-производственном центре CAD/CAM технологий. Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Ввиду значительного количества факторов, влияющих на изменение свойств динамической системы для обеспечения высокого качества получаемого продукта, выбираются чрезмерно консервативные условия обработки. Это ограничивает эффективность процесса и приводит к повышению себестоимости продукции. Соответственно необходимы современные подходы, которые позволят диагностировать текущее состояние обработки и вовремя принимать решение о замене инструмента, коррекции или изменении управляющей программы. Значение проводимого исследования состоит в предложении подхода к контролю механообработки, основанного на методе мониторинга процесса фрезерования в реальном времени, для определения возникающих погрешностей обработки, прогнозирования потенциальных проблем и увеличения продолжительности безотказной работы. **Предмет.** В статье рассматриваются особенности работы системы мониторинга в реальном времени с учетом фильтрации звуковой волны, минимизации шероховатости поверхности при механообработке одно- и двухлезвийным инструментом. **Цель работы** – определить влияние ориентации наклона сфероцилиндрического инструмента на величину шероховатости поверхности с использованием мониторинга в реальном времени в процессе фрезерования на технологическом оборудовании с ЧПУ. **Методика исследований.** В исследовании приводятся методы корреляционного и регрессионного анализа. Расчетные данные получены за счет виброакустической диагностики и измерены в диапазоне значений переменного угла наклона поверхности для одно- и двухлезвийного инструмента на основе положений теории колебаний и виброакустической диагностики, теории резания, цифровой обработки и цифровой фильтрации сигналов. **Результаты и обсуждения.** Экспериментальные данные, полученные при механообработке, позволили определить, что увеличение угла наклона однозубой фрезы практически не влияет на изменение амплитудных параметров шероховатости. Значения виброакустической диагностики и шероховатости при использовании двухзубового сфероцилиндрического инструмента показывают согласованную картину с эффектами, создаваемыми углами наклона и опережения. Полученные решения задач мониторинга и анализа параметров шероховатости позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований и уточнить представление о практической реализации способа акустического мониторинга процесса резания.

Для цитирования: Экспериментальное исследование динамики процесса механообработки концевыми сфероцилиндрическими фрезами / М.Р. Гимадеев, А.А. Ли, В.О. Беркун, В.А. Стельмаков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 44–56. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56.

***Адрес для переписки**
Гимадеев Михаил Радикович, к.т.н., доцент
Тихоокеанский государственный университет,
ул. Тихоокеанская, 136,
680035, г. Хабаровск, Россия
Тел.: 8 (924) 216-31-39, **e-mail:** 009063@pnu.edu.ru

Введение

Одним из основных направлений развития машиностроительного производства является повышение надежности механообработки пространственно-сложных поверхностей (ПСП) путем использования системы мониторинга в режиме реального времени, предназначенной для получения достоверной информации состояния процесса фрезерования и принятия необходимых управляющих решений [1–6].

Для решения задач контроля процесса фрезерования многими авторами исследуется изменение активной зоны контакта концевого фрезерного инструмента и обрабатываемой детали. Pimenov D. и др. [7] представили практические рекомендации по назначению ориентации инструмента к обрабатываемой детали с учетом динамики фрезерования для обеспечения шероховатости поверхности. Tan L. и др. [8] изучали влияние траекторий движения на износ сфероцилиндрического инструмента и шероховатость поверхности в процессе фрезерования. Результаты показали, что использование траектории движения снизу вверх позволяет обеспечить минимальные амплитудные параметры шероховатости, а превалирующим видом износа инструмента является адгезионный.

Вопросы, связанные с мониторингом состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях, рассмотрены в работах ученых Козочкина М.П., Сабирова Ф.С. [9]. В работе Shaffer D. и др. акустические сигналы были исследованы как способ контроля работы технологического оборудования [10]. Экспериментальным путем с различными режимами резания были статистически определены математические модели, показывающие изменение акустического сигнала для концевого фрезерования с одной режущей кромкой. Козлов А.А. и Аль–Джонид Халид в своем исследовании определили основные требования для построения диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени [11]. Chen и др. предложили систему мониторинга в реальном времени для повышения точности при производстве деталей [6] пространственно-сложной формы с компенсацией погрешностей [12]. Авторы Cheng DJ. и др. [13] исследовали влияние параметров резания на шероховатость обрабатываемой поверхности. Clayton Cooper [14], Anayet U Patwari и др. [15] на основе акустического сигнала провели анализ корреляции параметров шероховатости поверхности с уровнем звука. Авторы Sahinoglu A. и Rafighi M. [16] исследовали влияние параметров резания на шероховатость поверхности, вибрацию, интенсивность звука технологического оборудования при механической обработке. Многими авторами предложены способы обеспечения выходных характеристик обработки за счет управления упругими деформациями инструмента относительно заготовки с учетом состояния динамической системы (ДС) [17–20].

Анализ научных работ позволил сформулировать направление данного исследования: обобщить и получить новые знания, а также уточнить факт применимости акустического комплекса, регистрирующего сигнал через воздушную среду для контроля процесса резания, с фильтрацией помех и шума в реальном времени. Цель работы – определить влияние ориентации сфероцилиндрического инструмента на величину шероховатости поверхности с использованием мониторинга в реальном времени процесса фрезерования на технологическом оборудовании с ЧПУ. Вместе с этим на основании эмпирических данных необходимо разработать модель зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины подачи, диаметра и ориентации инструмента с корреляцией полученных значений и виброакустической диагностики.

Методика экспериментального исследования

Механообработка проводилась в попутном направлении с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), а также на заготовках, имеющих свойства АМг6, твердосплавными сфероцилиндрическими концевыми фрезами с покрытием TiN диаметром D = 8 мм и числом зубьев z = 1, z = 2. Подача на зуб (fz) принята равной 0,2 мм/зуб. Соотношение вылета инструмента принято l/D = 4, глубина резания a_p = 0,4 мм, боковой шаг a_e = 0,2 мм. Частота вращения шпинделя (n) фрезерного обрабатывающего центра DMG DMU 50 Ecoline для двузубой фрезы составляла 1500 мин$^{-1}$, для однозубой 3000 мин$^{-1}$.

Применение СОЖ является важным фактором интенсификации процесса резания, так как

твердый сплав имеет низкое сопротивление растягивающим напряжениям [21]. При использовании СОЖ на поверхностях контакта инструмента и материала заготовки образуются пленки, которые способствуют снижению адгезионного износа.

Контроль размерного износа режущего инструмента проводился при помощи контактного измерительного щупа TT140 фирмы Heidenhain. Точность прямолинейности при измерении параметров шероховатости прибором Surfcom 1800D составляла $\Delta = \pm (0{,}05 + 1{,}5L / 1000)$. Виброакустическая диагностика (рис. 1) осуществлялась посредством использования анализатора спектра «ZetLab 017-U2», вибродатчиков пьезоэлектрических «BC 110», микрофона «Zet BC 501» с диапазоном воспринимаемых частот 20 Hz...13 kHz и Samson Meteor Mic кардиоидной направленности с диапазоном 20 Hz...20 kHz. В качестве выходной оценки эффективности обработки использовалась шероховатость по параметру *Rz* (μm), виброперемещение *S* (μm) и амплитудно-частотная характеристика акустического сигнала *A* (dB), ω (Hz).

Использование конденсаторного микрофона имеет ряд преимуществ – малую неравномерность частотной характеристики, низкий уровень нелинейных и переходных искажений, высокую чувствительность и низкий уровень собственных шумов. Особое внимание стоит уделять повышению качества диагностического сигнала, который состоит из суммы спектра «полезного» сигнала и большого числа неодинаковых по уровню шумов, исходящих от разнообразных объектов. Для шумоподавления в реальном времени использовалось спектральное вычитание (рис. 2).

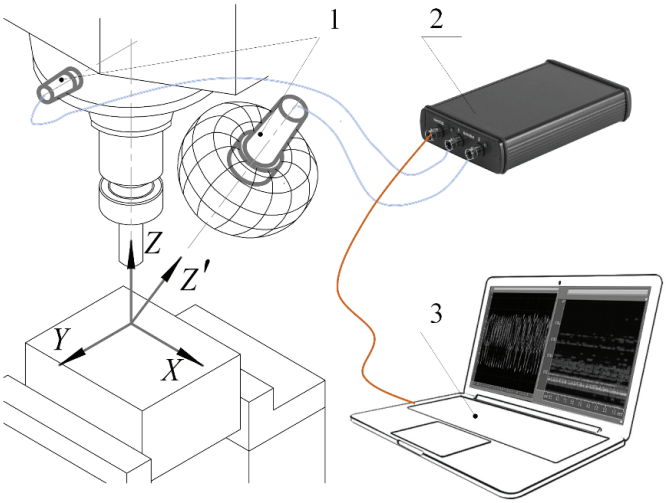


Рис. 1. Система мониторинга процесса механической обработки в реальном времени:

1 – датчик вибрации и микрофон с кардиоидной направленностью; *2* – Анализатор спектра «*ZetLab 017-U2*»; *3* – ПК с программным обеспечением ZETLAB (составлено авторами)

Fig. 1. Real–time monitoring in milling:

1 – Vibration sensor and microphone with cardioid orientation; *2* – Spectrum Analyzer «*ZetLab 017-U2*»; *3* – *PC* with *ZETLAB* software (formulated by the authors)

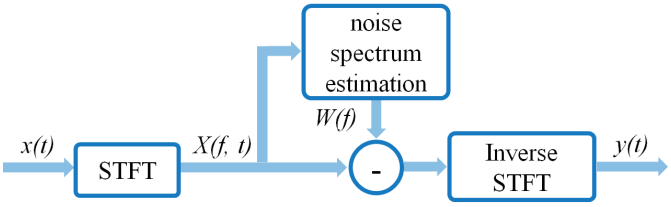


Рис. 2. Схема алгоритма спектрального вычитания шума:

x(*t*) – исходный сигнал; STFT – оконное преобразование Фурье; *W*(*f*) – функция весового окна; *y*(*t*) – преобразованный сигнал (составлено авторами)

Fig. 2. The proposed spectral subtraction algorithm scheme:

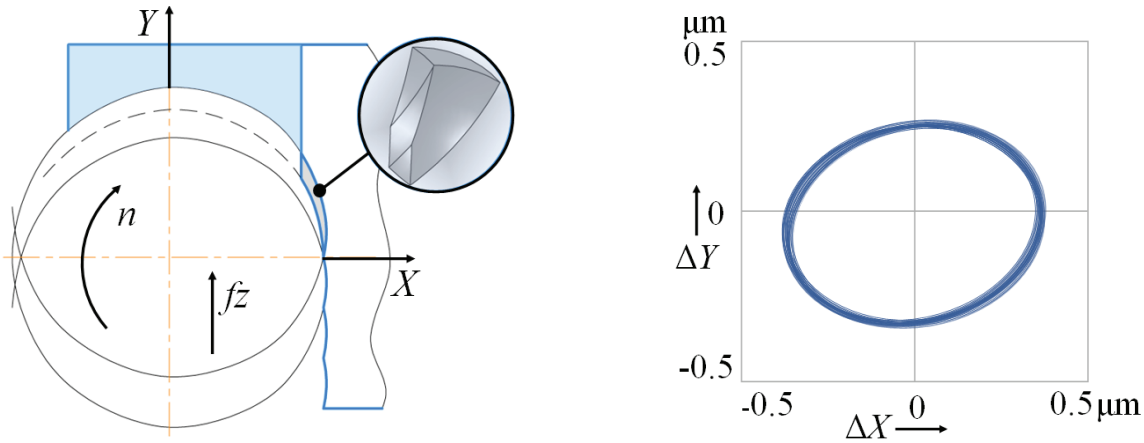
x(*t*) – original signal; *STFT* – Short Time Fourier Transform; *W*(*f*) – is the function of the weighting window; *y*(*t*) – transformed signal (formulated by the authors)

Разложение сигнала при спектральном вычитании проводилось с использованием специальной весовой функции [22] – окна Блэкмана.

Результаты и их обсуждение

В процессе механической обработки наблюдается изменение свойств ДС, определяющееся различными факторами. Раскрытие особенностей потери устойчивости траектории движения при фрезеровании (рис. 3) позволит определить пути повышения надежности работы технологического оборудования (ТО).

В данном исследовании выходным параметром являлась шероховатость, а для обеспечения требуемой шероховатости поверхности наряду с установлением режимов обработки выполнена оценка динамики пространственных колебаний передней опоры шпинделя (см. рис. 3, *б*). Вместе с этим амплитудные параметры шероховатости после обработки наклонёнными сфероцилиндрическими инструментами с различным



а *б*

Рис. 3. Схема прохождения режущих кромок фрезы через зону обработки:
а – траектория движения *i*-го зуба соответствующая эффективному диаметру инструмента;
б – траектория отклонения передней опоры шпинделя (составлено авторами)

Fig. 3. Pattern of the passage of the cutting edges of the cutter through the processing zone:
a – the trajectory of the ith tooth corresponding to the effective diameter of the tool; *б* – deviation trajectory of the front spindle support (formulated by the authors)

количеством зубьев при попутном фрезеровании представлены в табл. 1. При обработке однозубой фрезой изменение угла наклона практически не влияет на изменение амплитудных параметров шероховатости, т.е. для рассматриваемого случая диапазон запаса устойчивости ДС максимален. Применение двухзубового инструмента приводит к значительным изменениям выходных параметров, представленные расхождения часто вызваны отклонением и износом инструмента, следствием чего является изменение активной зоны резания и повышение уровня вибраций [6] (рис. 4).

Анализ табл. 1, а также рис. 4 позволяет сделать следующие заключения. Во-первых, чем больше амплитуда виброперемещений, соответствующая частоте резания, тем выше значение амплитудных параметров шероховатости. Во-вторых, амплитуда виброперемещений изменяется при увеличении угла наклона нелинейно, а снижение качества обработанной поверхности происходит ввиду упругих деформаций режущего инструмента, что объясняется распределением составляющих сил резания вдоль режущей кромки [20, 23].

Для практической реализации принципов акустической диагностики требуется, чтобы полученная информация текущего состояния процесса обработки была понятной и достоверной.

Таблица 1
Table 1

Параметры шероховатости после механической обработки сфероцилиндрическим инструментом
Roughness parameters after machining with a ball–end tool

Количество зубьев фрезы / Number of teeth	Угол наклона, ° / Angle of inclination, °	Параметры шероховатости, мкм / Roughness parameters, μm				
		Ra	*Rq*	*Rz*	*Rt*	*Rp*
1	10	0,436	0,543	2,143	4,094	1,490
	25	0,498	0,531	2,532	4,810	1,355
	40	0,401	0,502	2,512	4,800	1,271
2	10	0,661	0,824	3,048	4,536	2,001
	25	0,620	0,793	5,104	7,599	3,079
	40	0,373	0,465	2,391	3,559	1,383

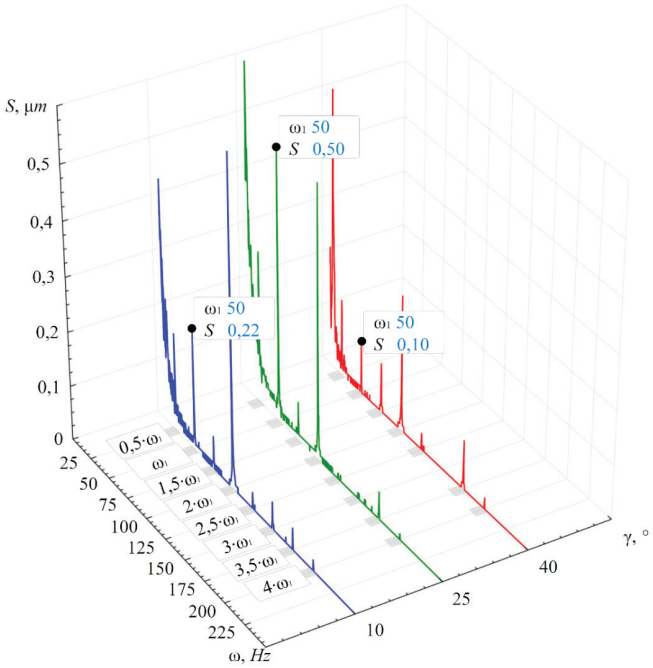


Рис. 4. Амплитуда виброперемещений для различных углов наклона инструмента с двумя зубьями при механической обработке (составлено авторами)

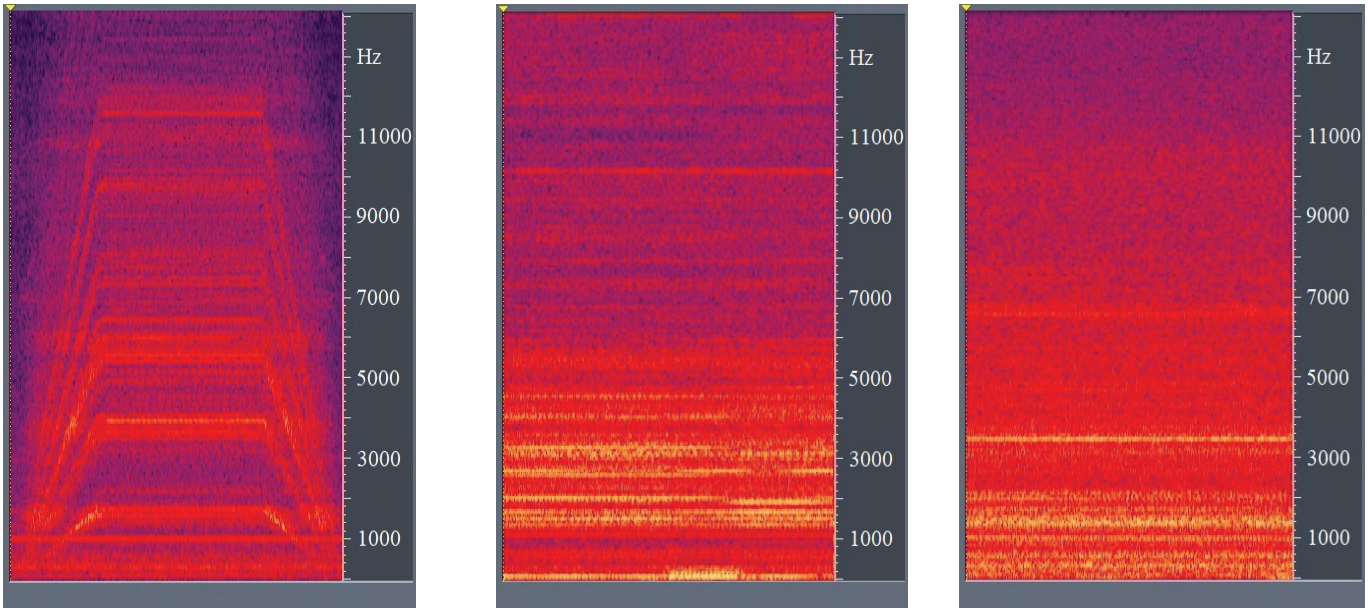
Fig. 4. Comparison of the frequency spectrum after milling with different angles of inclination, $z = 2$ (formulated by the authors)

На рис. 5 представлен акустический сигнал, полученный в ходе проведения эксперимента.

Частотные спектры, представленные на рис. 5, при подробном анализе согласуются с сигналами вибродиагностики, тем не менее целесообразным является анализ акустического сигнала в пределах частотного диапазона резания. Для выделения узкой полосы звуковой волны (рис. 6) применялся FFT-фильтр, который использовал быстрое преобразование Фурье (БПФ), размер БПФ при этом соответствовал значению 4096.

Частота ω_1 соответствует частоте резания (см. рис. 6), а по гармоническому закону резонансные частоты находятся как произведение ω_1 и целого числа (ω_1 = 50 Гц, $2\omega_1$ = 100 Гц и т. д.). Частоты вычисляют до 4-го порядка, так как с повышением порядка интенсивность частоты моды заметно снижается и на более высоких порядках практически не оказывает влияния на общую звуковую картину.

Из записей видно (рис. 7), что акустический сигнал модулируется оборотами инструмента, и при резании двухзубой фрезой амплитуда сигнала



а *б* *в*

Рис. 5. Частотный спектр звука:

а – разгон шпинделя до n = 8000 мин$^{-1}$ и остановка; *б* – обработка при $z = 1$, n = 3000 мин$^{-1}$; *в* – обработка при $z = 2$, n = 1500 мин$^{-1}$ (составлено авторами)

Fig. 5. Frequency spectrum of the acoustic signal:

а – spindle acceleration to 8000 min^{-1} and stop; *б* – machining process, $z = 1$, n = 3000 min^{-1}; *в* – machining process, $z = 2$, n = 1500 min^{-1} (formulated by the authors)

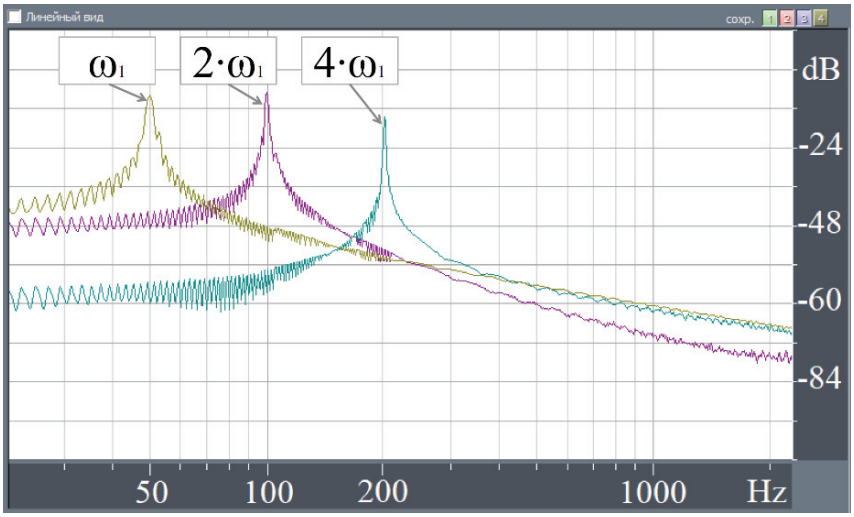


Рис. 6. АЧХ гармонических звуковых волн, полученных при фрезеровании с углом наклона 40 градусов (составлено авторами)

Fig. 6. Frequency response of harmonic sound waves obtained by milling with an inclination angle of 40 degrees (formulated by the authors)

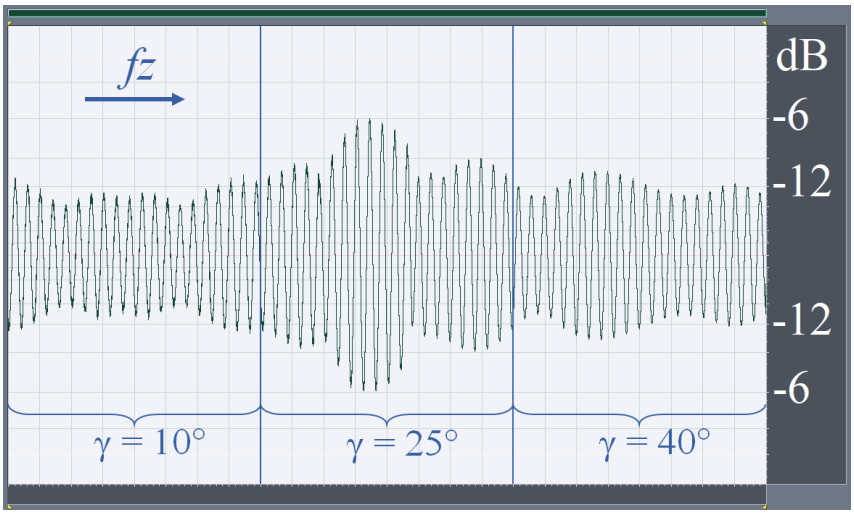


Рис. 7. Фильтрованный акустический сигнал (составлено авторами)

Fig. 7. Filtered acoustic signal (formulated by the authors)

изменяется тогда, когда изменяется угол наклона инструмента.

При исследовании спектра сигналов акустической диагностики установлено равномерное чередование фаз и отсутствие хаотического режима. После удаления шума, фильтрации и нормализации амплитуды сигнала определено ограниченное число точек бифуркации при изменении угла наклона инструмента в процессе механообработки. Указанные факты позволяют заключить, что способ акустического мониторинга обладает информативными диагностическими признаками.

Принимая во внимание повышающиеся требования к качеству деталей, стоит сфокусироваться на предсказуемости параметров шероховатости при механической обработке, в этом исследовании – за счет корреляции. Выявленные зависимости на основе величины коэффициента парной корреляции (табл. 2) указывают на возможность влияния на одни получаемые параметры через изменение других и на наличие

Таблица 2
Table 2

Расчетные значения коэффициентов парной корреляции
Calculated values of the pair correlation coefficients

Сравниваемые величины / Compared values		Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Существование линейной зависимости / The existence of a linear relationship	Характер линейной зависимости / Linear connection
Φ_1 (*Ra*)	R (*Rz*)	0,91	Весьма вероятно / Highly probable	Возрастающая / Increases
Φ_2 (*Rq*)	R (*Rz*)	0,92	Весьма вероятно / Highly probable	Возрастающая / Increases
Φ_3 (*Rt*)	R (*Rz*)	0,98	Весьма вероятно / Highly probable	Возрастающая / Increases
Φ_4 (*Rp*)	R (*Rz*)	0,93	Весьма вероятно / Highly probable	Возрастающая / Increases
Φ_5 (γ)	R (*Rz*)	–0,41	Маловероятно / Very improbable	Убывающая / Decreases
Φ_6 (*z*)	R (*Rz*)	0,40	Маловероятно / Very improbable	Возрастающая / Increases
Φ_5 (γ)	Φ_6 (*z*)	0,00	Не существует / Doesn't exist	–

предопределяющих микрорельеф поверхности технологических параметров.

Отмеченные в табл. 2 корреляции значимы на уровне $p < 0{,}05$. Принято считать, что линейная зависимость существует, если модуль коэффициента корреляции соответствует значению от 0,5 до 1. Однако величина коэффициента, заключенная в диапазоне 0,3…0,5, может указывать на существование нелинейной корреляции [24, 25]. График регрессии параметра *Rz* (рис. 8) свидетельствует о подтверждении вышеуказанного положения.

Для оценки степени влияния угла наклона на амплитудный параметр шероховатости *Rz* проведен многофакторный регрессионный анализ. Результатом проведенного анализа является математическая модель, характеризующая взаимосвязь между величиной шероховатости, подачи на зуб, диаметром и углом наклона инструмента, выраженная нормализованной моделью, графическая интерпретация которой показана на рис. 9:

$$Rz = 3 + 2{,}77_{fz} - 0{,}55_{\gamma} - 1{,}08_{D} -$$

$$- 0{,}51_{fz\gamma} - 1_{fzD} + 0{,}22_{\gamma D} + 0{,}2_{fz\gamma D}.$$

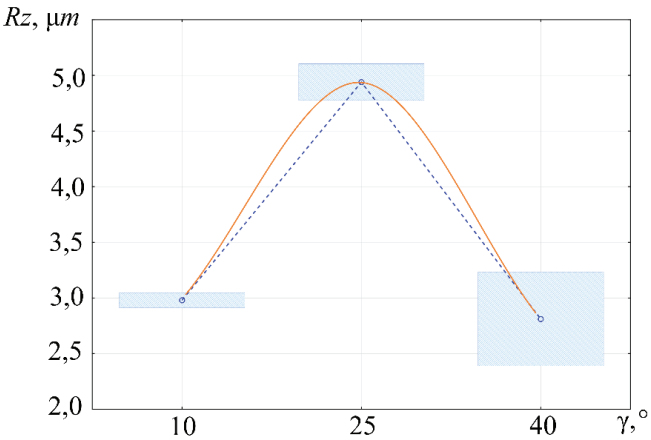
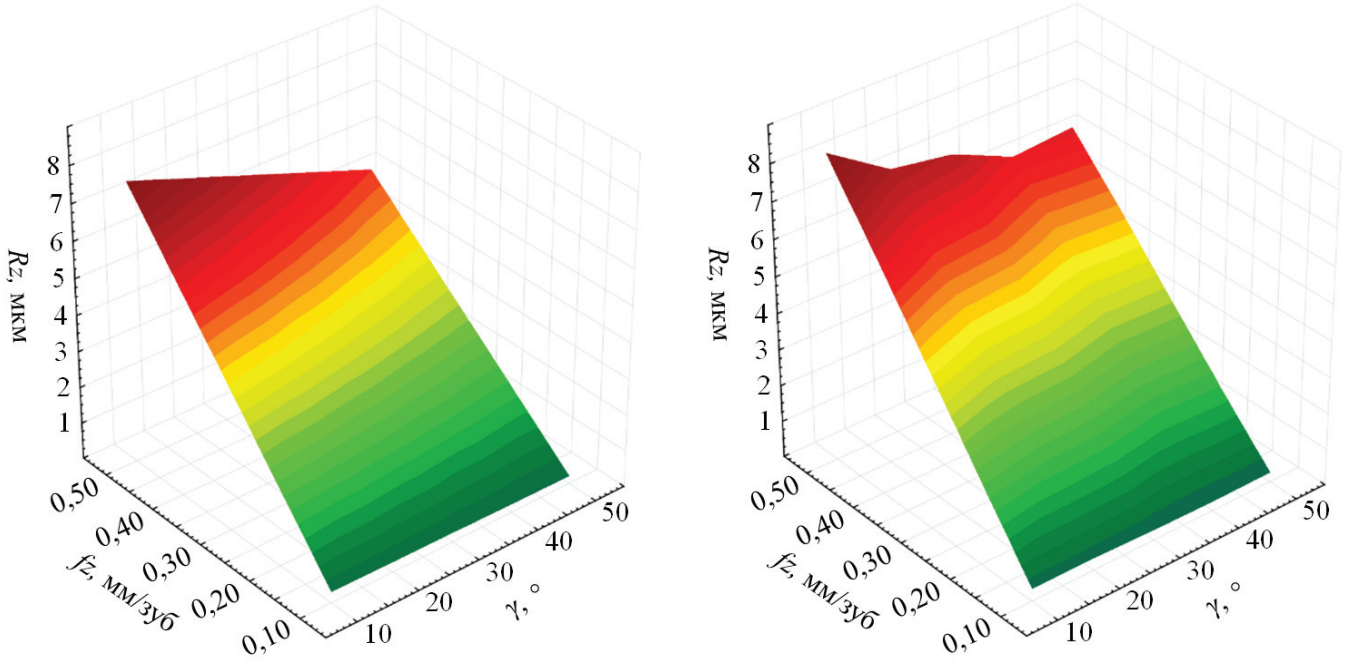


Рис. 8. Параметр *Rz* в зависимости от угла обработки для двухзубой фрезы (составлено авторами)

Fig. 8. Parameter *Rz* depending on the machining angle for a double-tooth cutter (formulated by the authors)

При доверительной вероятности $P = 0{,}95$ расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}$ меньше, чем табличное $F_{табл}$, соответственно гипотеза об адекватном представлении модели регрессии (см. формулу) была принята.

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных данных взаимосвязи параметров шероховатости, подачи на зуб и угла наклона, показанных на рис. 9, свидетельствует о незначитель-



а *б*

Рис. 9. Зависимости шероховатости *Rz* от подачи и угла наклона инструмента:
а – теоретическая; *б* – экспериментальная

Fig. 9. Dependences of the roughness *Rz* on the feed and the angle of inclination of the tool:
а – theoretical; *б* – experimental

ных различиях в представлении данных. Вместе с тем форма экспериментальной зависимости отличается от теоретически рассчитанной по уравнению модели регрессии не более чем на 10 %.

Выводы

Экспериментальные данные, полученные при механообработке, позволили определить, что увеличение угла наклона однозубой фрезы практически не влияет на изменение амплитудных параметров шероховатости.

Значения ВА диагностики и шероховатости при использовании двухзубового сфероцилиндрического инструмента показывают согласованную картину с эффектами, создаваемыми углами наклона и опережения. В то же время при частоте резания 50 Гц величина виброперемещения для угла наклона 25° в среднем в 2 раза больше, чем при 10 и 40°.

Амплитудные параметры шероховатости *Ra*, *Rq*, *Rt*, *Rp* показывают высокую степень корреляции с параметром *Rz*. В связи с нелинейной взаимосвязью между величиной *Rz*, подачей *fz*, углом наклона инструмента γ и диаметром инструмента *D* разработана регрессионная модель, которая позволяет прогнозировать шероховатость обрабатываемой поверхности.

Полученные решения задач мониторинга и анализа параметров шероховатости позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований и уточнить представление о практической реализации акустического способа контроля процесса резания в реальном времени.

Список литературы

1. Influence of vibration amplitude on tool wear during ball end milling of hardened steel / A.V. Anstev, D.T. Ngon, D.H. Trong, E.S. Yanov // 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development. – IEEE, 2018. – P. 232–236. – DOI: 10.1109/GTSD.2018.8595567.

2. Application of measurement systems in tool condition monitoring of Milling: A review of measurement science approach / D.Yu. Pimenov, M.K. Gupta, L.R.R. da Silva, M. Kiran, N. Khanna, G.M. Krolczyk // Measurement. – 2022. – Vol. 199. – P. 111503. – DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111503.

3. Monitoring system for high-tech equipment / V.B. Kuznetsova, D.V. Kondusov, A.I. Serdyuk, A.I. Sergeev // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, N 10. – P. 892–896. – DOI: 10.3103/S1068798X17100136.

4. Tool condition monitoring for high-performance machining systems – A review / A. Mohamed, M. Hassan, R. M'Saoubi, H. Attia // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 2206. – DOI: 10.3390/s22062206.

5. *Mali R.A., Gupta T.V.K., Ramkumar J.* A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 62. – P. 132–167. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.12.014.

6. *Гимадеев М.Р., Ли А.А.* Анализ систем автоматизированного обеспечения параметров шероховатости поверхности на основе динамического мониторинга // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 116–129. – DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.

7. Effect of the relative position of the face milling tool towards the workpiece on machined surface roughness and milling dynamics / D.Y. Pimenov, A. Hassui, S. Wojciechowski, M. Mia, A. Magri, D.I. Suyama, A. DBustillo, G. Krolczyk, M.K. Gupta // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9 (5). – P. 842. – DOI: 10.3390/app9050842.

8. Effect of cutter path orientations on cutting forces, tool wear, and surface integrity when ball end milling TC17 / L. Tan, C. Yao, J. Ren, D. Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 88. – P. 2589–2602. – DOI: 10.1007/s00170-016-8948-y.

9. Мониторинг состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях / М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров, А.Н. Боган, К.В. Мыслицев // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 8 (61). – С. 56–62.

10. Investigation of the feasibility of using microphone arrays in monitoring machining / D. Shaffer, I. Ragai, A. Danesh-Yazdi, D. Loker // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 15 (B). – P. 132–134. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.008.

11. *Козлов А.А., Аль-Джонид Х.* Диагностика и прогнозирование износа режущего инструмента в реальном времени // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 4 (12). – С. 17–21.

12. Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces / Y.P. Chen, J. Gao, H. Deng, D. Zheng // Precision Engineering. – 2013. – Vol. 37, N 1. – P. 203–212. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.08.003.

13. Modeling of time-varying surface roughness considering wear overlap per tooth in ball end finish milling / D.J. Cheng, H.J. Quan, S.J. Kim, S.W. Zhang, C.Y. Zhang // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2021. – Vol. 46. – P. 12309–12330. – DOI: 10.1007/s13369-021-05920-0.

14. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals / C. Cooper, P. Wang, J. Zhang, R.X. Gao, T. Roney, I. Ragai, D. Shaffer // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 49. – P. 105–111. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.004.

15. The surface roughness analysis using sound signal in turning of mild steel / A.U. Patwari, A.A. Zamee, M.H. Bhuiyan, S.M. Sakib // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 703. – P. 012011. – DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012011.

16. *Sahinoglu A., Rafighi M.* Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – Vol. 45. – P. 765–778. – DOI: 10.1007/s13369-019-04124-x.

17. *Лукьянов А.В., Алейников Д.П.* Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – Т. 56, № 4. – С. 70–82. – DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82.

18. *Алейников Д.П., Лукьянов А.В.* Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 28–35.

19. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84–99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.

20. *Gimadeev M.R., Stelmakov V.A., Gusliakov V.V.* Cutting forces and roughness during ball end milling of inclined surfaces // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2021. – Cham: Springer, 2021. – Vol. 2. – P. 926–937. – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_107.

21. *Кущева М.Е., Клауч Д.Н., Кобелев О.А.* Принципы выбора смазочно-охлаждающих технологических сред для обработки металлов резанием // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 2, № 1 (19). – С. 73–76.

22. *Левин Е.К., Аль-Дайбани А.М.* Анализ возможностей подавления влияния частотной характеристики канала связи на параметры речевого сигнала // Проектирование и технология электронных средств. – 2018. – № 3. – С. 14–18.

23. *Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х.* Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 3 (708). – С. 11–20. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20.

24. Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / М.Р. Гимадеев, В.М. Давыдов, А.В. Никитенко, А.В. Сарыгин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15, № 6 (174). – С. 243–248.

25. *Гимадеев М.Р., Давыдов В.М.* Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – № 5. – С. 219–224.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 44–56
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Experimental study of the dynamics of the machining process by ball-end mills

Mikhail Gimadeev [a, *], *Andrey Li* [b], *Vera Berkun* [c], *Vadim Stelmakov* [d]

Pacific National University, 136 Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-6685-519X, 009063@pnu.edu.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-9907-4936, 011864@pnu.edu.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-5249-2612, 2015103121@pnu.edu.ru, [d] https://orcid.org/0000-0003-2763-1956, 009062@pnu.edu.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 07 November 2022
Revised: 14 January 2023
Accepted: 21 January 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Ball-end mill
Surface roughness
Vibration
Correlation analysis
Regression analysis
Online monitoring
Tool tilt

Funding
The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Khabarovsk Territory within the framework of the regional competition for grants in the form of subsidies from the regional budget for the implementation of projects in the field of fundamental, technical, humanitarian and social sciences. Grant No. 93C/2022 on the topic "Improving the efficiency of process equipment during machining through online monitoring of an acoustic signal".

Acknowledgements
The authors express gratitude to A.V. Nikitenko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Technological Informatics and Information Systems (PNU, Khabarovsk), for helping to organize and conduct experimental research at the CAD/CAM technology training and production center. Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Due to a significant number of factors affecting the change in the properties of a dynamic system, excessively conservative processing conditions are chosen to ensure the high quality of the resulting product. This limits the efficiency of the process and leads to an increase in the cost of production. Accordingly, modern approaches are needed that will allow diagnosing the current state of processing and making timely decisions to replace the tool, correct or change the control program. The significance of the ongoing research is to propose a real-time monitoring approach to milling control to identify emerging processing errors, predict potential problems and improve uptime. **Subject.** The paper discusses the features of the real-time monitoring system during mechanical processing with a single- and double-edge cutting tool, taking into account acoustic wave filtering, minimizing surface roughness. **The purpose of the work** is to determine the effect of the inclination orientation of the ball-end tool on the surface roughness value using real-time monitoring during milling on *CNC* process equipment. **Methods.** The study provides methods of correlation and regression analysis. The calculated data were obtained by means of vibroacoustic diagnostics and measured in the range of values of the variable angle of inclination of the surface for single- and double-edge cutting tool based on the provisions of the theory of oscillations and vibroacoustic diagnostics, cutting theory, digital processing and digital filtering of signals. **Results and discussions.** Experimental data obtained during machining made it possible to determine that an increase in the angle of inclination of a single-edge cutting tool has practically no effect on the change in the amplitude parameters of roughness. The values of vibroacoustic diagnostics and roughness, when using a double-edge ball-end tool, show a consistent picture with the effects created by the angles of inclination and advance. The obtained solutions to the problems of monitoring and analyzing the roughness parameters can significantly reduce the amount of experimental research and clarify the idea of the practical implementation of the method of acoustic monitoring of the cutting process.

For citation: Gimadeev M.R., Li A.A., Berkun V.O., Stelmakov V.A. Experimental study of the dynamics of the machining process by ball-end mills. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 44–56. DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56. (In Russian).

*** Corresponding author**
Gimadeev Mikhail R., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Pacific National University,
136 Tihookeanskaya St.,
Khabarovsk, 680035, Russian Federation
Тел.: 8 (924) 216-31-39, **e-mail:** 009063@pnu.edu.ru

References

1. Anstev A.V., Ngon D.T., Trong D.H., Yanov E.S. Influence of vibration amplitude on tool wear during ball end milling of hardened steel. *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*. IEEE, 2018, pp. 232–236. DOI: 10.1109/GTSD.2018.8595567.

2. Pimenov D.Yu., Gupta M.K., da Silva L.R.R., Kiran M., Khanna N., Krolczyk G.M. Application of measurement systems in tool condition monitoring of milling: A review of measurement science approach. *Measurement*, 2022, vol. 199, p. 111503. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111503.

3. Kuznetsova V.B., Kondusov D.V., Serdyuk A.I., Sergeev A.I. Monitoring system for high-tech equipment. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 892–896. DOI: 10.3103/S1068798X17100136.

4. Mohamed A., Hassan M., M'Saoubi R., Attia H. Tool condition monitoring for high-performance machining systems – A review. *Sensors*, 2022, vol. 22, p. 2206. DOI: 10.3390/s22062206.

5. Mali R.A., Gupta T.V.K., Ramkumar J. A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 62, pp. 132–167. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.12.014.

6. Gimadeev M.R., Li A.A. Analysis of systems for automated provision of surface roughness parameters based on dynamic monitoring. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22 (2), pp. 116–129. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.

7. Pimenov D.Y., Hassui A., Wojciechowski S., Mia M., Magri A., Suyama D.I., Bustillo A., Krolczyk G., Gupta M.K. Effect of the relative position of the face milling tool towards the workpiece on machined surface roughness and milling dynamics. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (5), p. 842. DOI: 10.3390/app9050842.

8. Tan L., Yao C., Ren J., Zhang D. Effect of cutter path orientations on cutting forces, tool wear, and surface integrity when ball end milling TC17. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 2589–2602. DOI: 10.1007/s00170-016-8948-y.

9. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Bogan A.N., Myslivcev K.V. Monitoring sostoyaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na promyshlennykh predpriyatiyakh [Monitoring of process equipment for industrial enterprises]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University*, 2013, vol. 17, no. 8 (61), pp. 56–62. (In Russian).

10. Shaffer D., Ragai I., Danesh-Yazdi A., Loker D. Investigation of the feasibility of using microphone arrays in monitoring machining. *Manufacturing Letters*, 2018, vol. 15 (B), pp. 132–134. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.008.

11. Kozlov A.A., Al-Jonid Kh. Diagnostika i prognozirovanie iznosa rezhushchego instrumenta v real'nom vremeni [Diagnosis and prediction of cutting tool wear in real time]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2017, no. 4 (12), pp. 17–21. (In Russian).

12. Chen Y.P., Gao J., Deng H., Zheng D. Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces. *Precision Engineering*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 203–212. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.08.003.

13. Cheng D.J., Quan H.J., Kim S.J., Zhang S.W., Zhang C.Y. Modeling of time–varying surface roughness considering wear overlap per tooth in ball end finish milling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 12309–12330. DOI: 10.1007/s13369-021-05920-0.

14. Cooper C., Wang P., Zhang J., Gao R.X., Roney T., Ragai I., Shaffer D. Convolutional neural network-based tool condition monitoring in vertical milling operations using acoustic signals. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 49, pp. 105–111. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.07.004.

15. Patwari A.U., Zamee A.A., Bhuiyan M.H., Sakib S.M. The surface roughness analysis using sound signal in turning of mild steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 703, p. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012011.

16. Sahinoglu A., Rafighi M. Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 765–778. DOI: 10.1007/s13369-019-04124-x.

17. Lukyanov A.V., Aleynikov D.P. Issledovanie kolebanii sil vzaimodeistviya frezy s zagotovkoi pri povyshenii skorosti vrashcheniya shpindelya [Analysis of oscillations of cutting forces between a mill and a work-piece when increasing the spindle rotation speed]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 70–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82.

18. Aleinikov D.P., Lukyanov A.V. Issledovanie dinamiki krepleniya datchikov vibratsii shpindelei obrabatyvayushchikh tsentrov [Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 28–35.

19. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Sinergeticheskii podkhod k povysheniyu effektivnosti upravleniya protsessami obrabotki na metallorezhushchikh stankakh [Synergetic approach to improve the efficiency of machining process control on metalcutting machines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 84–99. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.

20. Gimadeev M.R., Stelmakov V.A., Gusliakov V.V. Cutting forces and roughness during ball end milling of inclined surfaces. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering.*. Cham, Springer, 2021, vol. 2, pp. 926–937. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_107.

21. Kushcheva M.E., Klauch D.N., Kobelev O.A. Printsipy vybora smazochno-okhlazhdayushchikh tekhnologicheskikh sred dlya obrabotki metallov rezaniem [Principles of selection of cutting technological mediums for metal cutting]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, vol. 2, no. 1 (19), pp. 73–76. (In Russian).

22. Levin E.K., AlDhaibani A.M. Analiz vozmozhnostei podavleniya vliyaniya chastotnoi kharakteristiki kanala svyazi na parametry rechevogo signala [Suppression opportunities analysis of the communication link frequency response influence on the voice signal parameters]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*, 2018, no. 3, pp. 14–18.

23. Ponomarev B.B., Nguen S.H. Vliyanie orientatsii instrumenta na sily rezaniya pri kontsevom frezerovanii [The influence of tool orientation on cutting forces during end milling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 3 (708), pp. 11–20. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20.

24. Gimadeev M.R., Davydov V.M., Nikitenko A.V., Sarygin A.V. Formirovanie parametrov sherokhovatosti na osnove korrelyatsionnykh svyazei pri chistovom frezerovanii prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostei [Formation of roughness parameters based on correlation relations during fi nishing milling of spatially complex surfaces]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2019, vol. 15, no. 6 (174), pp. 243–248.

25. Gimadeev M.R., Davydov V.M. Korrelyatsionnye svyazi pokazatelei sherokhovatosti pri frezerovanii sfericheskim instrumentom [Correlation of the roughness parameters in milling of spherical tool]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2019, no. 5, pp. 219–224.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 57–70
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки

Сергей Братан [a, *], *Анастасия Часовитина* [b]

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-9033-1174, serg.bratan@gmail.com, [b] https://orcid.org/0000-0001-6800-9392, nastya.chasovitina@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.4

История статьи:
Поступила: 23 декабря 2022
Рецензирование: 12 января 2023
Принята к печати: 25 января 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Шлифование титана
Вибрации
Взаимные колебания
Точные отверстия
Режимы обработки
Баланс перемещений в технологической системе

Благодарности:
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. В реальных производственных условиях технологические режимы, рекомендованные в научной литературе, не отражают заявленных качеств, вследствие того что не учитывают множество факторов, присущих процессу чистового шлифования, например, его стохастическую природу, изменение его динамических свойств, увеличение взаимных колебаний инструмента и заготовки, появляющихся из-за изменений состояния технологической системы, например увеличение вибраций станка вследствие неравномерного износа инструмента и др. Все разработанные ранее модели имеют ограниченную область применения, они не учитывают того, что появление колебаний приводит к колебанию глубины шлифования при случайном контактировании зерен с обрабатываемым материалом, где одна группа зерен срезает материал, другая попадают в след царапин, оставленных предшествующими зернами, и т.д. Это приводит к изменениям величин съема материала, шероховатости поверхности и других параметров технологической системы, что непосредственно сказывается на показателях точности обработки и качестве обработанных поверхностей. **Цель работы:** разработка математических моделей, устанавливающих взаимосвязи между режимами обработки и текущими параметрами зоны контакта при чистовом шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки. **Методами исследования** являются математическое моделирование с использованием основных положений теории абразивно-алмазной обработки. **Результаты и обсуждение.** Установлены взаимосвязи между режимами резания с текущими входными параметрами зоны контакта при шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки, которые позволяют определить параметры системы на выходе для избегания стоимостных потерь, в том числе снижения числа бракованных изделий и временных издержек. Построены нестационарные математические зависимости, позволяющие определять режимы резания в процессе реализации цикла шлифования с учетом величины относительных вибраций и начальной фазы. Установлено, что вместо установившегося процесса наблюдаются гармонические колебания, вызванные отклонениями формы круга, интенсивностью износа инструмента и другими факторами. Все вышеперечисленное оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности. Полученные модели являются универсальными для различных характеристик инструмента, однако для более адекватного описания процесса необходимы математические зависимости, учитывающие износ инструмента на различных связках, что является задачей дальнейших исследований.

Для цитирования: *Братан С.М., Часовитина А.С.* Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.

Введение

На сегодняшний день в машиностроительной индустрии реализуется множество способов обработки материалов с высокой точностью. К ним относят: ультразвуковую, лазерную обработку, процессы высокоскоростного фрезерования, а также операции абразивно-алмазной обработки, среди которых можно выделить процесс внутреннего шлифования. Процесс шлифования получил широкое распространение благодаря высокой производительности, низкой себестоимости и процессу обработки наряду с его точностью и качеством обработанного поверхностного слоя [1–7].

Несмотря на широкое многообразие моделей, описывающих процессы абразивно-алмазной

***Адрес для переписки**
Братан Сергей Михайлович, д.т.н., профессор
Севастопольский государственный университет,
ул. Университетская, 33,
299053, г. Севастополь, Россия
Тел.: +79787155019, **e-mail:** serg.bratan@gmail.com

обработки, в современной литературе практически отсутствуют научно обоснованные рекомендации, позволяющие гарантированно обеспечивать получение заданных параметров качества изделий в нестационарных условиях протекания технологического процесса [8–12]. Поэтому всестороннее изучение закономерностей процессов формообразования поверхностей, разработка математических моделей послужит созданию на этой основе высокоэффективных технологических процессов и оптимальных конструкций абразивного инструмента.

Анализ работ в области теории шлифования позволяет сделать заключение, что все существующие модели процессов абразивно-алмазной обработки можно разделить на два класса. К первому классу (импульсные модели) относятся математические зависимости, моделирующие воздействие на заготовку единичных абразивных зерен. Обрабатываемая поверхность формируется как совокупность следов зерен, которые в сечении, перпендикулярном направлению скорости резания, идентичны профилю радиуса вершины абразивного зерна, например, математические модели, разработанные И.М. Брозголем, Д.В. Королевым, Е.Н. Масловым, Ю.К Новоселовым, В.А. Носенко и др. [13–17].

Ко второму классу (геометрические модели) относятся математические зависимости, моделирующие воздействие на заготовку совокупностью элементарных режущих профилей. На этой основе выполнены работы по механизмам образования шероховатости поверхности, например, математические модели, разработанные Ю.Р. Витенбергом, Ю.В. Линником, С.А. Поповым, В.А.Щеголевым, А.П. Хусу и другими учеными [18–23].

В реальных производственных условиях технологические режимы, рекомендованные в рассмотренных выше работах и справочной литературе, не отражают заявленных качеств, вследствие того, что не учитывают множество факторов, присущих процессу чистового шлифования, например, его стохастическую природу, изменение его динамических свойств, увеличение взаимных колебаний инструмента и заготовки, появляющихся из-за изменений состояния технологической системы, например, увеличение вибраций станка вследствие неравномерного износа инструмента и др. Все разработанные ранее модели имеют ограниченную область применения и не учитывают того, что появление колебаний приводит к колебанию глубины шлифования при случайном контактировании зерен с обрабатываемым материалом, где одна группа зерен срезает материал, другая попадают в след царапин, оставленных предшествующими зернами, и т. д. Это приводит к изменениям величин съема материала, шероховатости поверхности и других параметров технологической системы, что непосредственно сказывается на показателях точности обработки и качестве обработанных поверхностей. Для компенсации погрешностей расчета в реальных производственных условиях используют различные технологические приемы, например, используют инструменты с мягкими связками, снижают величины подач и другие приемы, что снижает производительность операции и повышает стоимость изготовленных изделий.

Наиболее перспективным подходом решения указанной проблемы является продолжение исследований операций шлифования (в частности внутреннего), в ходе которых необходимо выявить и описать взаимосвязи между входными факторами и выходными показателями процесса.

На основе установленных взаимосвязей необходимо построить математические модели, адекватно моделирующие процесс шлифования, учитывающие взаимные колебаний инструмента и заготовки.

На сегодняшний день одним из наиболее трудоемких технологических процессов является операция шлифования. Объем изделий, где в качестве окончательной обработки применялось внутренне шлифование, не уступает объему изделий, обработанных методом наружного. Однако внутреннее шлифование является более сложным по причине тяжелого протекания процесса обработки и меньшей жесткостью режущих инструментов.

В связи с вышеизложенным **целью данной статьи** является разработка математических моделей, устанавливающих взаимосвязи между режимами обработки и текущими параметрами зоны контакта при чистовом шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки.

Методика исследований

Схема процесса окончательной чистовой обработки отверстия (внутреннее шлифование) приводится на рисунке.

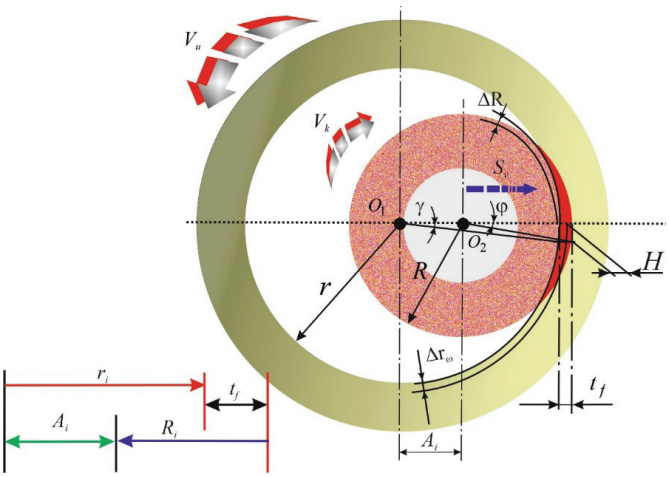


Схема процесса внутреннего шлифования

Internal grinding process scheme

После установки детали в патрон станка инструменту и заготовке задают вращение с окружной скоростью V_u и V_k соответственно. При перемещении шлифовальной головки в направлении радиальной подачи S_y разность радиусов векторов заготовки и инструмента становится меньше межцентрового расстояния A_i, возникает область взаимопроникновения инструмента в материал заготовки – зона контакта [24].

В соответствии с размерной схемой процесса внутреннего шлифования, изображенной на рис. 1, уравнение баланса перемещений принимает вид

$$\Delta A_i = S_{yi} + N = \Delta t_{fi} - \Delta R_i + \Delta r_{\omega i-1} + \Delta A_{yi}, \quad (1)$$

где ΔA_i – текущее изменение величины межцентрового расстояния за счет радиальной подачи шлифовальной головки, м; S_{yi} – радиальная подача ниструмента, м; N – предварительный натяг, м; Δt_{fi} – изменение фактической глубины резания, м; ΔR_i – текущий износ инструмента, м; $\Delta r_{\omega i-1}$ – величина съема материала перед текущим оборотом, м; ΔA_{yi} – текущее изменение упругих деформаций.

При внутреннем шлифовании наблюдается неравномерный съем припуска, на поверхности заготовки формируется волнистость [25, 26]. На основании этого можно предположить, что не только съем припуска будет изменяться по гармоническому закону, но и другие параметры, входящие в уравнение баланса перемещений.

Для наглядной демонстрации этого явления произведем расчет цикла обработки посредством решения уравнения баланса перемещений [27, 28]. Исходные данные: материал заготовки – титановый сплав ВТ3, $d = 150$ мм; шлифовальная головка AW 60×25×13 63C F90 M 7 B A 35 м/с; окружная скорость круга – $V_k = 35$ м/с; скорость заготовки – $V_u = 0,25$ м/с; радиальная подача – $S_{yi} = 0,005$ мм/об; количество зерен в единице площади $n_g = 15,86 \cdot 10^6$ шт/м^2, радиус округления вершины зерна $\rho_g = 7,31 \cdot 10^{-6}$ м).

Результаты и их обсуждение

При расчете параметров этапов врезания предварительно задаются значения поперечной подачи $= 5 \cdot 10$ м и предварительного натяга $N = 10 \cdot 10^{-6}$ м согласно величинам, приведенным в справочной литературе [16].

Выполним расчет первого оборота.

1. Найдем сумму параметров предварительного натяга и поперечной подачи:

$$\Delta A_1 = S_{y1} + N = 5 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6} = 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

2. Приращение упругих деформаций определится в соответствии с формулой

$$\Delta A_{yi} = \omega_{TS} \cdot \Delta P_y, \quad (2)$$

где ω_{TS} – податливость системы, $\omega_{TS} = 30 \cdot 10^{-9}$ м·Н; ΔP_y – приращение нормальной составляющей силы резания, $\Delta P_y \geq 0$.

Сделаем допущение, что на первом обороте отсутствует приращение нормальной составляющей силы резания $\Delta P_y = 0$, следовательно,

после подстановки значений параметров в формулу получим

$$\Delta A_{y1} = 0, \text{ м.}$$

3. Вычисление глубины микрорезания.

На предыдущем обороте величина радиального съема материала отсутствует: $\Delta r_0 = 0$.

Учитывая допущение, что на первом обороте износ шлифовального круга равен нулю, $\Delta R_1 = 0$, то формула (1) определится как

$$\Delta A_1 = \Delta t_{f1} = 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Отсюда вычисляется значение глубины микрорезания:

$$t_{f1} = S_{y1} + \Delta t_{f1} = 0 + 15 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

4. На текущем обороте величина радиального съема материала может быть определена по формуле

$$\Delta r_{\omega i} = \frac{t_{fi}^2}{\frac{7\pi}{15} t_{fi} + \frac{13\pi}{3} \frac{V_u}{K_c (V_k + V_u) n_g \sqrt{D_e \rho_g}} + |\Psi|^{0,4}}, \quad (3)$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, $K_c = 0,85$; V_u – скорость вращения заготовки, м/с; V_k – скорость вращения круга, м/с; n_g – количество зерен в единице площади, шт/м^2; ρ_g – радиус вершин округления зерна, м; D_e – эквивалентный диаметр, м,

Эквивалентный диаметр рассчитывается по формуле

$$D_e = \frac{Dd}{D - d}, \quad (4)$$

где D – диаметр шлифовального круга, м; d – диаметр заготовки, м.

После подстановки данных в формулу (4) получим

$$D_e = \frac{150 \cdot 60}{150 - 60} = 0,1, \text{ м.}$$

Значение переменной Ψ будет вычислено в зависимости от начальной фазы отклонений:

при $\psi_y = 0(2\pi)$ и $\psi_y = \pi$:

$$\Psi = \frac{15}{16} A_\omega^2 \sqrt{t_f} + \frac{15 A_\omega^2 V_u \sin 2\gamma}{32\omega D_e^{0,5}} + \frac{15 A_\omega V_u^3 \sin\gamma}{2 D_e^{1,5} \omega^3} + \frac{15 A_\omega V_u^2 \sqrt{t_f} \left(2 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 - 1\right)}{2 D_e \omega^2},$$

или

$$\Psi = \frac{15}{16} A_\omega^2 \sqrt{t_f} + \frac{15 A_\omega^2 V_u \sin 2\gamma}{32\omega D_e^{0,5}} + \frac{15 A_\omega V_u^3 \sin\gamma}{2 D_e^{1,5} \omega^3} + \frac{15 A_\omega V_u^2 \sqrt{t_f} \sqrt{1 - \sin^2(\gamma)}}{2 D_e \omega^2}.$$

При $\psi_y = \frac{\pi}{2}$ и $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$:

$$\Psi = \frac{15}{16} A_\omega^2 \sqrt{t_f} - \frac{15 A_\omega^2 V_u \sin 2\gamma}{32\omega D_e^{0,5}},$$

где A_ω – амплитуда, мкм; ω – циклическая частота, рад/с; ψ_y – начальная фаза вибраций; переменная $\gamma = \frac{\omega (t_f - y)^{0,5} D_e^{0,5}}{V_u}$, где y – рассматриваемый уровень.

При начальной фазе относительных колебаний $\psi_y = 0(2\pi)$ и амплитуде $A_\omega = 0,2 t_{fi}$, $\omega = 628$ рад/с съем материала на текущей обороте с учетом вибраций:

$$\Delta r_{\omega 1} = \frac{(15 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} 15 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85(35 + 0,25) 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left|0,17 \cdot 10^{-12}\right|^{0,4}} = 5,89 \cdot 10^{-6}.$$

5. Толщина поверхностного слоя, в котором распределена шероховатость, вычисляется по зависимости

$$H_i = t_{fi} - \Delta r_{\omega i}. \quad (5)$$

При подстановке значений параметров в формулу (5) получим

$$H_i = t_{fi} - \Delta r_{\omega i} =$$

$$= 15 \cdot 10^{-6} - 5,89 \cdot 10^{-6} = 9,11 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

6. Сила резания может быть рассчитана следующим образом:

$$P_{yi} = 3\sqrt{2} L_k n_g \sqrt{\rho_g h_{g\max} H_i D_e} \times$$

$$\times \left(0,055 H_i \frac{\sin\beta}{\sin\beta_1} + 0,061\sqrt{\rho_g h_{g\max}} \right) \tau_s, \quad (6)$$

где L_k – высота шлифовального круга, м; $h_{g\max}$ – износ зерна, $h_{g\max} = 10 \cdot 10^{-6}$ м; β и β_1 – углы резания абразивного материала, $\beta = 22°$ и $\beta_1 = 34°$; τ_s – напряжение сдвига, Н/м^2.

Напряжение сдвига определяется как

$$\tau_s = \frac{\sigma}{1,5}, \quad (7)$$

где σ – предел прочности материала, $\sigma = 2 \cdot 10^9$ Н/м^2,

$$\tau_s = \frac{2 \cdot 10^9}{1,5} = 13,33 \cdot 10^8, \text{ Н/м}^2.$$

Путем подстановки данных в формулу (6) определяется сила резания:

$$P_{y1} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 9,11 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times$$

$$\times \left(0,055 \cdot 9,11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061\sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times$$

$$\times 13,33 \cdot 10^8 = 2,899, \text{ Н.}$$

7. Уточнение ранее полученных расчетных значений: Δt_{f1}, Δr_1, P_{y1}.

Определяется значение приращения упругих деформаций:

$$\Delta A_{y1} = \omega_{TS} \Delta P_y = \omega_{TS}(P_{y1} - P_{y0}) =$$

$$= 30 \cdot 10^{-9}(2,899 - 0) = 8,698 \cdot 10^{-8}, \text{ м.}$$

Вычисляются величины приращения глубины микрорезания и глубины микрорезания соответственно:

$$\Delta t_{f1} = \Delta A_1 - \Delta A_{y1} =$$

$$= 15 \cdot 10^{-6} - 8,698 \cdot 10^{-8} = 14,91 \cdot 10^{-6}, \text{ м;}$$

$$t_{f1} = t_{f0} + \Delta t_{f1} =$$

$$= 0 + 14,91 \cdot 10^{-6} = 14,91 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Величина съема материала составит:

$$\Delta r_{\omega 1} = \frac{(14,91 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} 14,91 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85(35+0,25) 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left| 0,17 \cdot 10^{-12} \right|^{0,4}} = 5,844 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Толщина слоя, в котором распределена шероховатость:

$$H_1 = t_{f1} - \Delta r_{\omega 1} = 14,91 \cdot 10^{-6} -$$

$$-5,844 \cdot 10^{-6} = 9,069 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Величина силы резания:

$$P_{y1} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 9,069 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times$$

$$\times \left(0,055 \cdot 9,069 \cdot 10^{-6} \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061\sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \times$$

$$\times 13,33 \cdot 10^8 = 2,884, \text{ Н.}$$

8. Расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля рассчитывается по зависимости

$$W_{mi} = \frac{t_{fi} - \Delta r_{\omega i}}{2}. \quad (8)$$

Подставим числовые значения в формулу (8):

$$W_{m1} = \frac{14,91 \cdot 10^{-6} - 5,844 \cdot 10^{-6}}{2} =$$

$$= 4,535 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Одним из заключительных этапов расчета параметров рассматриваемого оборота является сравнение значения W_{m1} с величиной радиального съема материала $\Delta r_{\omega 1}$:

$$W_{m1} \le \Delta r_{\omega 1}, \quad 4,535 \cdot 10^{-6} \le 5,844 \cdot 10^{-6}.$$

В связи с тем, что величина $\Delta r_{\omega 1}$ превосходит значение W_{m1}, величина средней арифметической длины профиля R_a определится как

$$R_a = \frac{0,25 V_u^{0,4} t_{f1}^{0,6}}{K_c (V_u + V_k)^{0,4} n_g^{0,4} D_e^{0,2} \rho_g^{0,2}} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 0,25^{0,4} (14,91 \cdot 10^{-6})^{0,6}}{0,85^{0,4} (0,25+35)^{0,4} (15,866 \cdot 10^6) 0,1^2 (7,31 \cdot 10^{-6})^2} =$$

$$= 1,041 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Расчет второго оборота.

1. Найдем сумму параметров предварительного натяга и поперечной подачи:

$$\Delta A_2 = S_y + N = 5 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 15 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

2. Определим глубину микрорезания:

$$t_{f2} = S_y + t_{f1} = 5 \cdot 10^{-6} + 14,91 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 19,91 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

3. Рассчитаем значение радиального съема материала на текущем обороте:

$$\Delta r_{\omega 2} = \frac{(19,91 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 19,91 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85(35+0,25) 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left|0,24 \cdot 10^{-12}\right|^{0,4}} = 8,513 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

4. Вычислим толщину слоя, в котором находится шероховатость:

$$H_2 = t_{f2} - \Delta r_{2\omega} = 19,91 \cdot 10^{-6} - 8,513 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 11,4 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

5. Сила резания на текущем обороте будет равна:

$$P_{y2} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times$$

$$\times \left(0,055 \cdot 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}\right) \times$$

$$\times 13,33 \cdot 10^8 = 3,789, \text{ Н.}$$

6. Уточнение значений параметров: Δt_{f2}, Δr_2, ΔP_{y2}.

Приращение упругих деформаций:

$$\Delta A_{y2} = \omega_{TS} \Delta P_y = \omega_{TS} (P_{y2} - P_{y1}) =$$

$$= 30 \cdot 10^{-9} (3,789 - 2,884) = 2,716 \cdot 10^{-8}, \text{ м.}$$

Износ инструмента на текущем обороте может быть вычислен по формуле

$$\Delta R_i = 0,1 t_{fi-1}. \quad (9)$$

После подстановки величин в формулу (9) имеем:

$$\Delta R_2 = 0,1 t_{\ 1} = 0,1 \cdot 14,91 \cdot 10 =$$

$$= 14,91 \cdot 10^{-7}, \text{ м.}$$

Из формулы (1) определим приращение глубины микрорезания:

$$\Delta t_{f2} = \Delta A_2 - \Delta A_{y2} + \Delta R_2 - \Delta r_{\omega 1} =$$

$$= 15 \cdot 10^{-6} - 2,716 \cdot 10^{-8} + 14,91 \cdot 10^{-7} -$$

$$-5,844 \cdot 10^{-6} = 10,62 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Рассчитаем величину глубины микрорезания:

$$t_{f2} = t_{f1} + \Delta t_{f2} = 14,91 \cdot 10^{-6} + 10,62 \cdot 10^{-6} = 25,53 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Радиальный съем материала:

$$\Delta r_{\omega 2} = \frac{(25,53 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 25,53 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85(35+0,25)15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left|0,28 \cdot 10^{-12}\right|^{0,4}} = 11,79 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Толщина слоя, в котором расположена шероховатость:

$$H_2 = t_{f2} - \Delta r_{\omega 2} = 25,53 \cdot 10^{-6} -$$

$$-11,79 \cdot 10^{-6} = 13,74 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Величина силы резания:

$$P_{y2} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 13,74 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times$$

$$\times \left(0,055 \cdot 13,74 \cdot 10^{-6} \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}\right) \times$$

$$\times 13,33 \cdot 10 = 4,774, \text{ Н.}$$

7. Расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля:

$$W_{m2} = \frac{t_{f2} - \Delta r_{\omega 2}}{2} =$$

$$= \frac{25,53 \cdot 10^{-6} - 11,79 \cdot 10^{-6}}{2} = 6,87 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Сравним значения W_{m2} и $\Delta r_{\omega 2}$:

$$W_{m2} \le \Delta r_{\omega 2},$$

$$6,87 \cdot 10^{-6} \le 11,79 \cdot 10^{-6},$$

следовательно, таким же образом, как и на предыдущем обороте, вычислим величину средней арифметической длины профиля R_a, м:

$$R_a = \frac{0,25 V_u^{0,4} t_{f2}^{0,6}}{K_c (V_u + V_k)^{0,4} n_g^{0,4} D_e^{0,2} \rho_g^{0,2}} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 0,25^{0,4} (25,53 \cdot 10^{-6})^{0,6}}{0,85^{0,4} (0,25+35)^{0,4} (15,866 \cdot 10^6) 0,1^2 (7,31 \cdot 10^{-6})^2} =$$

$$= 1,438 \cdot 10^{-6}.$$

Для последующих оборотов этапа врезания и установившегося режима обработки ($S_y = \text{const}$) расчет баланса системы выполняется по приведенной выше методике.

Этап выхаживания

На данном этапе отсутствуют поперечная подача $S_y = 0$ и предварительный натяг $N = 0$ [15]. Но за счет упругих деформаций зерна еще врезаются и, следовательно, идет съем металла $t_{f_{\text{выз}}} > 0$.

Первый оборот

1. Сумма предварительного натяга и поперечной подачи составит:

$$\Delta A_{\text{вых1}} = S + N = 0 + 0 = 0, \text{ м.}$$

2. Износ инструмента:

$$\Delta R_{\text{вых1}} = 0,1 t_{f_{\text{уст}}} =$$

$$= 0,1 \cdot 35,52 \cdot 10^{-6} = 35,52 \cdot 10^{-7}, \text{ м.}$$

3. Приращение упругих деформаций:

$$\Delta A_{y_{\text{вых1}}} = \omega_{TS} \Delta P_y =$$

$$= \omega_{TS} (P_{y_{\text{уст10}}} - P_{y_{\text{уст9}}}) =$$

$$= 30 \cdot 10^{-9} (6,257 - 6,257) = 0, \text{ м.}$$

4. Приращение глубины микрорезания:

$$\Delta t_{f_{\text{вых1}}} = \Delta A_{\text{вых1}} - \Delta A_{\text{вых1}} +$$

$$+ \Delta R_{\text{вых1}} - \Delta r_{\omega_{\text{уст10}}} = 0 - 0 + 35,52 \cdot 10^{-7} -$$

$$-18,52 \cdot 10^{-6} = -14,97 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

5. Глубина микрорезания определится как

$$t_{f_{\text{вых1}}} = t_{f_{\text{уст}}} + \Delta t_{f_{\text{вых1}}} = 35,52 \cdot 10^{-6} - 14,97 \cdot 10^{-6} = 20,55 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

6. Радиальный съем материала:

$$\Delta r_{\omega_{\text{вых1}}} = \frac{(20,55 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 20,55 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \frac{0,25}{0,85 \cdot (35+0,25) \cdot 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}}} + \left|0,25 \cdot 10^{-12}\right|^{0,4}} = 8,867 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

7. Толщина слоя, в котором находится шероховатость:

$$H_{\text{вых1}} = t_{f_{\text{вых1}}} - \Delta r_{\omega_{\text{вых1}}} =$$

$$= 20,55 \cdot 10^{-6} - 8,867 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 11,68 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

8. Сила резания:

$$P_{y_{\text{вых1}}} = 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 11,68 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \times$$

$$\times \left(0,055 \cdot 11,68 \cdot 10^{-6} \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}\right) \times$$

$$\times 13,33 \cdot 10^8 = 3,902, \text{ Н.}$$

9. Величина расстояния от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля:

$$W_{m_{\text{вых1}}} = \frac{t_{f_{\text{вых1}}} - \Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}}{2} =$$

$$= \frac{20,55 \cdot 10^{-6} - 8,867 \cdot 10^{-6}}{2} =$$

$$= 5,84 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Сравниваем полученные величины $W_{m_{\text{вых1}}}$ и $\Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}$:

$$W_{m_{\text{вых1}}} \leq \Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}, \quad 5,84 \cdot 10^{-6} < 8,867 \cdot 10^{-6}.$$

По причине того что величина $\Delta r_{\omega_{\text{вых1}}}$ больше, чем $W_{m_{\text{вых1}}}$, то значение средней арифметической длины профиля R_a, м:

$$R_a = \frac{0,25 V_u^{0,4} t_{f_{\text{вых1}}}^{0,6}}{K_c (V_u + V_k)^{0,4} n_g^{0,4} D_e^{0,2} \rho_g^{0,2}} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 0,25^{0,4} (20,55 \cdot 10^{-6})^{0,6}}{0,85^{0,4} (0,25+35)^{0,4} (15,866 \cdot 10^6) 0,1^2 (7,31 \cdot 10^{-6})^2} =$$

$$= 1,262 \cdot 10^{-6}.$$

Расчет режимов продолжается до тех пор, пока не будет достигнута величина заданной шероховатости $R_a = 0,81 \cdot 10^{-6}$, м. Расчетные данные приведены в табл. 1.

Полученные данные показывают, что на этапе установившегося процесса величина фактической глубины микрорезания изменяется по гармоническому закону и не является величиной постоянной $(\Delta t_{fi} \neq 0)$ в отличие от того, как рекомендуется принимать в классической методике расчета [16].

Проверку результатов вычислений осуществляли сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

Шлифование осуществляли на станке модели Knuth RSM 500 CNC,отличающийся повышенной виброустойчивостью к внешним воздействиям. Исходные данные: материал заготовки: титановый сплав ВТ3, $d = 150$ мм; шлифовальная головка AW 60×25×13 63C F90 M 7 B A 35 м/с; окружная скорость круга – $V_k = 35$ м/с; скорость заготовки – $V_u = 0,25$ м/с; радиальная подача – $S_{yi} = 0,005$ мм/об; количество зерен в единице площади $n_g = 15,86 \cdot 10^6$ шт/м^2, радиус округления вершины зерна $\rho_g = 7,31 \cdot 10^{-6}$ м).

После обработки профилограмм, снятых с обработанных заготовок, рассчитали относительную погрешность расчетных данных с результатами эксперимента. Данные сведены в табл. 2.

Таблица 1

Table 1

Расчетные данные

Calculated data

№ п/п No.	Δt_{fi}	t_{fi}	ΔR_i	$\Delta r_{\omega i-1}$	ΔA_{yi}	H_i
Вр. 1	$14,91 \cdot 10^{-6}$	$14,91 \cdot 10^{-6}$	0	0	$8,698 \cdot 10^{-8}$	$9,069 \cdot 10^{-6}$
Вр. 2	$10,62 \cdot 10^{-6}$	$25,53 \cdot 10^{-6}$	$1,491 \cdot 10^{-6}$	$5,884 \cdot 10^{-6}$	$2,716 \cdot 10^{-8}$	$13,74 \cdot 10^{-6}$
Вр. 3	$5,737 \cdot 10^{-6}$	$31,27 \cdot 10^{-6}$	$2,553 \cdot 10^{-6}$	$11,79 \cdot 10^{-6}$	$2,413 \cdot 10^{-8}$	$15,78 \cdot 10^{-6}$
Вр. 4	$2,617 \cdot 10^{-6}$	$33,89 \cdot 10^{-6}$	$3,127 \cdot 10^{-6}$	$15,49 \cdot 10^{-6}$	$1,964 \cdot 10^{-8}$	$16,56 \cdot 10^{-6}$
Вр. 5	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$34,94 \cdot 10^{-6}$	$3,389 \cdot 10^{-6}$	$17,32 \cdot 10^{-6}$	$1,595 \cdot 10^{-8}$	$16,85 \cdot 10^{-6}$
Уст. 1	$0,389 \cdot 10^{-6}$	$35,33 \cdot 10^{-6}$	$3,494 \cdot 10^{-6}$	$18,09 \cdot 10^{-6}$	$1,372 \cdot 10^{-8}$	$16,95 \cdot 10^{-6}$
Уст. 2	$0,14 \cdot 10^{-6}$	$35,47 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$	$18,38 \cdot 10^{-6}$	$1,267 \cdot 10^{-8}$	$16,98 \cdot 10^{-8}$
Уст. 3	$0,05 \cdot 10^{-6}$	$35,52 \cdot 10^{-6}$	$3,547 \cdot 10^{-6}$	$18,49 \cdot 10^{-6}$	$1,225 \cdot 10^{-8}$	$16,99 \cdot 10^{-6}$
Вых.1	$-14,97 \cdot 10^{-6}$	$20,55 \cdot 10^{-6}$	$3,552 \cdot 10^{-6}$	$18,52 \cdot 10^{-6}$	0	$11,68 \cdot 10^{-6}$
Вых. 2	$-6,88 \cdot 10^{-6}$	$13,66 \cdot 10^{-6}$	$2,055 \cdot 10^{-6}$	$8,867 \cdot 10^{-6}$	$7,062 \cdot 10^{-8}$	$8,451 \cdot 10^{-6}$
Вых. 3	$-3,88 \cdot 10^{-6}$	$9,78 \cdot 10^{-6}$	$1,366 \cdot 10^{-6}$	$5,211 \cdot 10^{-6}$	$3,737 \cdot 10^{-8}$	$6,437 \cdot 10^{-6}$
				$3,343 \cdot 10^{-6}$		

Таблица 2

Table 2

Относительная погрешность расчетов

Relative error of calculations

№ п/п No.	t_{fi}	$\Delta r_{\omega i-1}$	H_i		Относительная погрешность $\delta_H = \frac{\Delta H}{H_{\text{экспер}}} 100\ \%$, % / Relative error $\delta_H = \frac{\Delta H}{H_{\text{exp}}} 100\ \%$, %
			Расчетный / Calculated	Эксприментальный / Experimental	
Вр. 1	$14,91 \cdot 10^{-6}$	0	$9,069 \cdot 10^{-6}$	$8,16 \cdot 10^{-6}$	11,13
Вр. 2	$25,53 \cdot 10^{-6}$	$5,884 \cdot 10^{-6}$	$13,74 \cdot 10^{-6}$	$12,53 \cdot 10^{-6}$	9,6
Вр. 3	$31,27 \cdot 10^{-6}$	$11,79 \cdot 10^{-6}$	$15,78 \cdot 10^{-6}$	$17,82 \cdot 10^{-6}$	11,45
Вр. 4	$33,89 \cdot 10^{-6}$	$15,49 \cdot 10^{-6}$	$16,56 \cdot 10^{-6}$	$18,88 \cdot 10^{-6}$	12,29
Вр. 5	$34,94 \cdot 10^{-6}$	$17,32 \cdot 10^{-6}$	$16,85 \cdot 10^{-6}$	$19,87 \cdot 10^{-6}$	15,2
Уст. 1	$35,33 \cdot 10^{-6}$	$18,09 \cdot 10^{-6}$	$16,95 \cdot 10^{-6}$	$19,9 \cdot 10^{-6}$	14,82
Уст. 2	$35,47 \cdot 10^{-6}$	$18,38 \cdot 10^{-6}$	$16,98 \cdot 10^{-8}$	$19,94 \cdot 10^{-6}$	14,84
Уст. 3	$35,52 \cdot 10^{-6}$	$18,49 \cdot 10^{-6}$	$16,99 \cdot 10^{-6}$	$19,97 \cdot 10^{-6}$	14,92
Вых. 1	$20,55 \cdot 10^{-6}$	$18,52 \cdot 10^{-6}$	$11,68 \cdot 10^{-6}$	$12,73 \cdot 10^{-6}$	8,25
Вых. 2	$13,66 \cdot 10^{-6}$	$8,867 \cdot 10^{-6}$	$8,451 \cdot 10$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	9,13
Вых. 3	$9,78 \cdot 10^{-6}$	$5,211 \cdot 10^{-6}$	$6,437 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	12,34
		$3,343 \cdot 10^{-6}$			

Сравнение расчетных и экспериментальных данных указывает на то, что принятые математические модели обеспечивают высокую точность расчетов (относительная погрешность составляет менее 15 %) и позволяют аналитически определить значения выходных параметров процесса внутреннего шлифования, учитывая влияние относительных колебательных движений шлифовального круга и заготовки.

Выводы

Установлены взаимосвязи режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при шлифовании точных отверстий с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки, которые позволяют определить параметры системы на выходе для избегания стоимостных потерь, в том числе снижения числа бракованных изделий и временных издержек. Построены нестационарные математические зависимости, позволяющие определять режимы резания в процессе реализации цикла шлифования с учетом величины относительных вибраций и начальной фазы.

Установлено, что вместо установившегося процесса наблюдаются гармонические колебания, вызванные отклонениями формы круга, интенсивностью износа инструмента и другими факторами. Все вышеперечисленное оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности.

Полученные модели являются универсальными для различных характеристик инструмента, однако для более адекватного описания процесса необходимы математические зависимости, учитывающие износ инструмента на различных связках, что является задачей дальнейших исследований.

Список литературы

1. *Kassen G., Werner G.* Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges // Industrie-Anzeiger. – 1969. – N 87. – P. 91–95.

2. *Malkin S., Guo C.* Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.

3. *Hou Z.B., Komanduri R.* On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1579–1593. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.

4. *Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D.* A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 148. – P. 09004–09008. – DOI: 10.1051/matecconf/20181480900.

5. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 4. – P. 166–171. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.

6. *Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K.* Dynamic model of the grinding process // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 280. – P. 425–432. – DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.

7. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding / M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 58. – P. 422–427. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.

8. *Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J.* Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 832–840. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.

9. *Tawakolia T., Reinecke H., Vesali A.* An experimental study on the dynamic behavior of grinding wheels in high efficiency deep grinding // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 1. – P. 382–387. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.

10. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // Simulation Modeling Practice and Theory. – 2015. – Vol. 57. – P. 88–99. – DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.

11. *Yu H., Wang J., Lu Y.* Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 86. – P. 1933–1943. – DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.

12. *Guo J.* Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 75. – P. 1245–1252. – DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.

13. *Брозголь И.М.* Влияние микрогеометрии поверхности и метода окончательной обработки дорожек качения колец на долговечность шариковых подшипников // Технология подшипникостроения: научно-технический бюллетень ЭНИИПП. – М., 1958. – № 17. – С. 118–125.

14. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при

абразивной обработке. – Саратов: Саратов. ун-т, 1975. – 202 с.

15. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

16. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с. – ISBN 978-617-612-051-3.

17. *Носенко В.А.*, *Носенко С.В.* Технология шлифования металлов. – 2-е изд., стер. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2019. – 616 с.

18. *Витенберг Ю.Р.* Применение корреляционной теории для оценки шлифованной поверхности // Вестник машиностроения. – 1969. – Вып. 1. – С. 55–57.

19. *Линник Ю.В., Хусу А.П.* Математико-статическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании // Инженерный сборник. – 1954. – Т. 20. – С. 154–159.

20. *Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М.* Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.

21. *Щеголев В.А., Уланова М.Е.* Эластичные абразивные и алмазные инструменты. – Л.: Машиностроение, 1977. – 148 с.

22. *Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А.* Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

23. *Okamura K., Nakajima T.* Elastic properties of grinding weel // Memories of the Faculty of Engineering, Kyoto University. – 1969. – Vol. 31, pt. 4. – P. 490–517.

24. *Стадник Т.В.* Повышение эффективности обработки длинномерных цилиндрических заготовок из алюминиевых и титановых сплавов на операциях ленточного ротационного шлифования: дис. … канд. техн. наук. – Севастополь, 2022. – 198 с.

25. *Братан С.М., Часовитина А.С.* Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 9 (135). – С. 3–9. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9.

26. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С.М. Братан, С.И. Рощупкин, А.С. Часовитина, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

27. *Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A.* The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037. – P. 384–389. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.

28. *Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S.* Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38, pt. 4. – P. 2088–2091. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 57–70
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece

Sergey Bratan [a, *], ***Anastasia Chasovitina*** [b]

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-9033-1174, serg.bratan@gmail.com, [b] https://orcid.org/0000-0001-6800-9392, nastya.chasovitina@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 23 December 2022
Revised: 14 January 2023
Accepted: 25 January 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Grinding of titanium
Vibrations
Mutual vibrations
Pinholes
Processing modes
Balance of movements in the technological system

Acknowledgements
Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. In real production conditions, the technological modes recommended in the scientific literature do not reflect the declared qualities, due to the fact that it does not take into account many factors inherent in the process of finishing grinding, for example, its stochastic nature, changes in its dynamic properties, an increase in mutual vibrations of the tool and the workpiece that appear due to changes in the state of the technological system, for example, an increase in vibrations machine tool due to uneven tool wear, etc. All previously developed models have a limited scope of application, it does not take into account the fact that the appearance of vibrations leads to fluctuations in the depth of grinding, with accidental contact of grains with the material being processed, where one group of grains cuts off the material, the other gets into the trace of scratches left by previous grains, etc. This leads to changes in the values of material removal, surface roughness and other parameters of the technological system, which directly affects the accuracy of processing and the quality of the machined surfaces. **The purpose of the work** is to develop mathematical models that establish the relationship between the processing modes and the current parameters of the contact zone during the fine grinding of pinholes, taking into account the mutual vibrations of the tool and the workpiece. **The research methods** are mathematical simulation using the basic provisions of the theory of abrasive-diamond processing. **Results and discussion.** The interrelations between the cutting modes and the current input parameters of the contact zone when grinding pinholes are established, taking into account the mutual vibrations of the tool and the workpiece, which make it possible to determine the parameters of the system at the output to avoid cost losses, including reducing the number of defective products and time costs. Non-stationary mathematical dependences are constructed that allow determining the cutting modes during the implementation of the grinding cycle, taking into account the magnitude of relative vibrations and the initial phase. It is established that instead of a steady process, harmonic oscillations are observed caused by deviations in the shape of the circle, the intensity of tool wear and other factors, all of the above has a significant impact on the quality of the machined surface. The obtained models are universal for various characteristics of the tool, however, for a more adequate description of the process, mathematical dependencies are needed that take into account the wear of the tool on various binders, which is the task of further research.

For citation: Bratan S.M., Chasovitina A.S. Simulation of the relationship between input factors and output indicators of the internal grinding process, considering the mutual vibrations of the tool and the workpiece. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 57–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70. (In Russian).

References

1. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges [Kinematic parameters of the grinding process]. *Industrie-Anzeiger = Industry Scoreboard*, 1969, no. 87, pp. 91–95. (In German).

2. Malkin S., Guo C. *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. New York, Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.

*** Corresponding author**
Bratan Sergey M., D. Sc. (Engineering), Professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya str,
299053, Sevastopol, Russian Federation
Tel.: +7 (978)7155019, **e-mail:** serg.bratan@gmail.com

3. Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.

4. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 148, pp. 09004–09008. DOI: 10.1051/matecconf/20181480900.

5. Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monn M. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 4, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.

6. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 280, pp. 425–432. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.

7. Ahrens M., Damm J., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 422–427. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.

8. Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, pp. 832–840. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.

9. Tawakolia T., Reinecke H., Vesali A. An experimental study on the dynamic behavior of grinding wheels in high efficiency deep grinding. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 382–387. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.

10. Jung J., Kim P., Kim H., Seok J. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2015, vol. 57, pp. 88–99. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.

11. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 1933–1943. DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.

12. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 1245–1252. DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.

13. Brozgol' I.M. Vliyanie mikrogeometrii poverkhnosti i metoda okonchatel'noi obrabotki dorozhek kacheniya kolets na dolgovechnost' sharikovykh podshipnikov [Influence of surface microgeometry and the method of finishing the raceways of rings on the durability of ball bearings]. *Tekhnologiya podshipnikostroeniya* [Bearing Engineering Technology]. Moscow, 1958, no. 17, pp. 118–125.

14. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostei instrumenta i detali pri abrazivnoi obrabotke* [Investigation of the processes of formation of tool and workpiece surfaces during abrasive processing]. Saratov, Saratov University Publ., 1975. 202 p.

15. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of materials grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p.

16. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke* [Dynamics of surface shaping during abrasive processing]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p. ISBN 978-617-612-051-3.

17. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Technology of metal grinding]. 2nd ed. Stary Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2019. 616 p.

18. Vitenberg Yu.R. Primenenie korrelyatsionnoi teorii dlya otsenki shlifovannoi poverkhnosti [Application of the correlation theory to evaluate the polished surface]. *Vestnik mashinostroeniya = Soviet Engineering Research*, 1969, iss. 1, pp. 55–57. (In Russian).

19. Linnik Yu.V., Khusu A.P. Matematiko-staticheskoe opisanie nerovnostei profilya poverkhnosti pri shlifovanii [Mathematical and static description of surface profile irregularities during grinding]. *Inzhenernyi sbornik = Engineering Review*, 1954, vol. 20, pp. 154–159.

20. Popov S.A., Malevskiy N.P., Tereshchenko L.M. *Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tverdykh splavov* [Diamond-abrasive processing of metals and hard alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 264 p.

21. Shchegolev V.A., Ulanova M.E. *Elastichnye abrazivnye i almaznye instrumenty* [Elastic abrasive and diamond tools]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 148 p.

22. Khusu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. *Sherokhovatost' poverkhnostei: teoretiko-veroyatnostnyi podkhod* [Roughness of surfaces: a probabilistic approach]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 344 p.

23. Okamura K., Nakajima T. Elastic properties of grinding weel. *Memories of the Faculty of Engineering*, *Kyoto University*, 1969, vol. 31, pt. 4, pp. 490–517.

24. Stadnik T.V. *Povyshenie effektivnosti obrabotki dlinnomernykh tsilindricheskikh zagotovok iz alyuminievykh i titanovykh splavov na operatsiyakh lentochnogo rotatsionnogo shlifovaniya.* Diss. kand. tekhn. nauk. [Improving the efficiency of processing long cylindrical workpieces on aluminum and titanium alloys in operations of belt rotary grinding. PhD eng. sci. diss.]. Sevastopol, 2022. 198 p.

25. Bratan S.M., Chasovitina A.S. Modelirovanie vliyaniya otnositel'nykh vibratsii instrumenta i zagotovki na s"em materiala pri vnutrennem shlifovanii [Modelling of tool and piece part relative motion effect on material removal in internal cylindrical grinding]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2022, no. 9 (135), pp. 3–9. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9.

26. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K. Vliyanie na veroyatnost' udaleniya materiala otnositel'nykh vibratsii abrazivnogo instrumenta i zagotovki pri chistovom shlifovanii [The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.17212/19946309-202224.13347.

27. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1037, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.

28. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pt. 4, pp. 2088–2091. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 71–84
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-71-84

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Синтез механизма привода технологической машины непрерывного действия

Юрий Подгорный [1, 2, a, *], *Александр Кириллов* [1, 3, b], *Вадим Скиба* [1, c], *Татьяна Мартынова* [1, d], *Дмитрий Лобанов* [4, e], *Никита Мартюшев* [5, f]

[1] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[2] Новосибирский технологический институт (филиал) Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Красный пр., 35 (ул. Потанинская, 5), г. Новосибирск, 630099, Россия
[3] Новосибирский государственный педагогический университет, ул. Вилюйская, 28, г. Новосибирск, 630126, Россия
[4] Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия
[5] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-1664-5351, pjui@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-8142-2787, kirillovalvs@mail.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-5811-5519, martynova@corp.nstu.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru, [f] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.8, 519.6:539.3

История статьи:
Поступила: 15 декабря 2022
Рецензирование: 14 января 2023
Принята к печати: 25 января 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Структурный синтез механизма
Группы Ассура
Параметрический синтез механизма
Кинематическая схема
Кулачково-кулисный механизм
Кинематические параметры
Коэффициент трения
Угол трения

Финансирование:
Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_23.

Благодарности:
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие конструкции перемешивающих устройств работают при постоянной угловой скорости рабочего органа. При осуществлении данного процесса возникают зоны, в которых движение материала может отсутствовать. При этом качество готовой продукции снижается. При совершении рабочим органом движения с переменной угловой скоростью силы инерции при смене их знака способствуют созданию условий, при которых смесь будет терять контакт с лопастью и переходить на новые уровни движения, а это способствует повышению качества и интенсивности процесса перемешивания. **Цель работы.** Повышение качества перерабатываемой смеси на лопастных горизонтальных машинах. **Методы.** Теоретические исследования выполнены с использованием основных положений теории машин и механизмов, структурного и параметрического синтеза, кинематического анализа, математического и компьютерного моделирования. **Результаты и обсуждения.** В соответствии с предложенной методикой был проведен синтез кулачково-кулисного механизма, позволивший подобрать основные размеры для кулачкового механизма: минимальный радиус и межосевое расстояние. Для синтеза кулисной группы были использованы параметры синтезированного кулачкового механизма и, используя основные параметры, для кулисной группы (размер входного звена, угол начального положения второго плеча коромысла и оси кулисы, равный 90°). Получен угол размаха для коромысла, равный 103°. В результате проведенного кинематического расчета установлено, что выстой рабочих валов находится в пределах 80°. Качество смеси можно оценить по углу застойной зоны, который образуется при движении сыпучего материала. В статических условиях он равен 0,846°, а при переменной угловой скорости – 0,550°. Теоретически подтверждено, что инерционные силы, меняющие знак четыре раза за один цикл, обеспечат встряхивание и отскок перемешиваемой массы от лопастей, что, в свою очередь, позволит существенно повысить качество смеси.

Для цитирования: Синтез механизма привода технологической машины непрерывного действия / Ю.И. Подгорный, А.В. Кириллов, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, Д.В. Лобанов, Н.В. Мартюшев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 71–84. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-71-84.

Введение

В работах [1–7] большое внимание уделено процессу перемешивания продукта и отмечено, что сам процесс происходит в стационарных условиях, т. е. при постоянных угловых скоростях перемешивающих устройств, и это является глав-

***Адрес для переписки**
Подгорный Юрий Ильич, д.т.н., профессор
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.:+7 (383) 346-17-79, **e-mail:** pjui@mail.ru

ным препятствием получения качественной смеси. Отмечается также, что при работе смесителя через некоторое время скорость движения смеси становится равной скорости рабочего органа смесителя. В результате этого смесь движется послойно: частицы компонентов большей массы перемещаются по орбитам большего радиуса, частицы меньшей массы – по орбитам меньшего радиуса. При этом в смесителях имеются зоны, где движение материала незначительно или вообще отсутствует, в результате качество готовой продукции снижается. При сообщении рабочему органу переменной угловой скорости происходит переход масс продукта из одного слоя в другой, что способствует повышению качества и интенсивности процесса смешивания [8]. Известны различные конструкции приводов для смесителей непрерывного действия [9–11]. Одно из них [9] представляет собой рабочую камеру, выполненную в виде полуцилиндра, внутри которой вдоль ее оси размещен рабочий вал с лопастями. Смесь заполняет камеру равномерно по всей ее ширине. Привод к рабочему валу осуществляется от электродвигателя посредством клиноременной и зубчатой передачи и имеет постоянную скорость вращения. Известна конструкция с двумя рабочими валами [10], которые совершают сложное движение за счет сочетания вращательного и возвратно-поступательного движения. Вращение передается от двигателя на рабочие валы посредством ременной передачи и двухступенчатого редуктора, а возвратно-поступательное движение – через одноступенчатую зубчатую и червячную передачу и эксцентриковый механизм. К недостаткам этих конструкций смесителей можно отнести следующие: во время простоев машины смесь в рабочей камере уплотняется, повторный запуск машины затруднен, а в отдельных случаях и становится невозможным из-за увеличения нагрузок на месильные лопасти при их поступательном движении. Нагрузки становятся настолько большими, что приводят к значительным деформациям лопастей, в связи с чем требуется ремонт рабочих органов. С данной проблемой столкнулись на макаронной фабрике в г. Новосибирске, где в составе автоматической линии эксплуатируется двухвальный смеситель непрерывного действия (тестомесильная машина). Одно из решений данной проблемы предложено в работе [11], согласно которой привод к рабочим валам включает в себя двигатель, механизм для сообщения рабочим валам вращательного движения и передаточный механизм для сообщения им возвратно-поступательного движения. При этом на валу между червяком и зубчатым колесом одноступенчатой зубчатой передачи установлена предохранительная муфта. Такое исполнение тестомесильной машины позволяет повысить ее производительность за счет сокращения времени простоев, обусловленных отсутствием необходимости выгрузки из рабочей камеры уплотнившейся тестовой массы и ее повторной загрузки.

Повысить качество продукта за счет ликвидации зон непромеса позволит также наличие неравномерного вращения рабочих органов, а следовательно, и продукта [1–8, 12]. Проектирование механизмов, обеспечивающих неравномерное вращение рабочих валов, представляет собой сложную комплексную проблему и зависит от ряда факторов, таких как перерабатываемое сырье, его плотность, форма элементов, взаимодействующих с сырьем. В настоящей работе предлагается в качестве кинематической схемы привода рабочих валов месильной машины использовать кулачково-кулисный механизм, включающий кулачковую группу и группу Ассура второго класса третьего вида [2, 4, 6, 12–18]. При этом следует отметить, что вращательное движение от вала электродвигателя передается на кривошип, несущий двуплечий рычаг, на одном плече которого расположен ролик, размещенный в пазу неподвижно закрепленного кулачка, а на другом сухарь, который находится в пазу кулисы, имеющий ось вращения, совпадающую с осью вращения рабочего вала машины.

Цель работы – повышение качества перерабатываемой смеси на горизонтальных смесителях (месильных машинах).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Разработка методики синтеза привода к рабочим валам машины, включающая:

– структурный синтез и разработку кинематической схемы механизма;

– параметрический синтез, заключающийся в выборе основных размеров кулачкового и кулисного механизмов, обеспечивающих неравномерность движения рабочих валов;

– определение необходимых и достаточных кинематических характеристик рабочих валов машины.

2. Уточнение качественных характеристик смеси.

Методика исследований

Основной задачей для достижения поставленной цели является разработка методики синтеза привода валов машины, которая позволяет спроектировать механизм, осуществляющий повышение качества перерабатываемой смеси. Ниже изложены составляющие, входящие в методику в порядке их решения. Первым представлен структурный синтез механизма, обеспечивающий переменную угловую скорость рабочих валов месильной машины. Синтез проводился в следующей последовательности: в качестве первой группы, осуществляющей переменную скорость рабочих валов машины, принята кулачковая группа с неподвижно закрепленным кулачком *1*, роликом *2*, двуплечим рычагом *3*; в качестве второй – принята кулисная группа, несущая сухарь *4*, подвижно закрепленный на втором плече рычага *3* и размещенный в пазу кулисы *5* (рис. 1). В связи с тем что в предлагаемой конструкции кулачок является неподвижным, а ось двуплечего рычага перемещается по окружности, синтез такого механизма представляет определенное затруднение. В этой связи для синтеза данного механизма предлагается ввести новую модель, полагая, что кулачок является подвижным, а двуплечий рычаг свободно вращается относительно неподвижной оси (рис. 1).

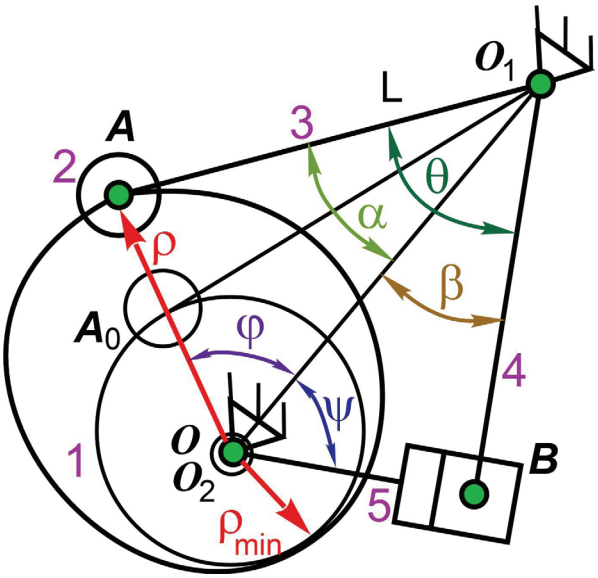


Рис. 1. Общая структурная схема механизма

Fig. 1. General block scheme of the mechanism

Для проверки существования механизма определим степень его подвижности по формуле Чебышёва [19]. Степень подвижности этого механизма составила $W = 2$, что говорит о правильности выбора структурной схемы (дополнительная степень подвижности появилась за счет вращения ролика вокруг его оси).

Приступая ко второй задаче синтеза, проведем его как параметрический. Полагаем, что для перемещения частиц крошкообразной массы необходимо, чтобы рабочий вал с лопастями мог выстаивать в верхнем положении для создания благоприятных условий при перемещении продукта из верхних слоев вниз. Так как механизм состоит из целого ряда элементов кинематических пар, то выстой необходимо оценивать по последнему звену – кулисе, которая приводит во вращательное движение рабочие валы. Поэтому, принимая за основу ее угол поворота, а также перемещения, скорости и ускорения, можно выбрать тот рациональный вариант, который удовлетворит поставленную цель. Для рассматриваемого случая это означает наличие выстоя, плавность и непрерывность кинематических характеристик рабочего вала машины [20–29].

Выбор схемы механизма обусловлен некоторыми уже известными конструктивными решениями привода, например: конструкцией рабочих валов, расположением передач, положением двигателя и конструкцией несущей системы. В связи с тем что по приводу кулачковый механизм является первым по отношению к кулисной группе, синтез начнем с него. В соответствии с работами [25–39] можно принять перемещения центра ролика по циклоиде с ходом толкателя $H = 25$ мм; длину коромысла $L = 60$ мм; угол циклоиды $\beta = 180°$. Он был принят исходя из предположения, что период переменной угловой скорости месильных валов должен быть равным половине их полного оборота. В качестве искомых параметров в результате синтеза предлагается определить: минимальный радиус кулачка ρ_{min}, межосевое расстояние $a = OO_1$; начальный угол ψ_0.

Тогда

$$h = \frac{H}{\pi}\left(\frac{\pi\varphi}{\beta} - \frac{1}{2}\sin\left(\frac{2\pi\varphi}{\beta}\right)\right), \qquad (1)$$

где h – текущее значение перемещения; H – максимальное значение перемещения; φ – текущее значение угла поворота кулачка; β – угол профиля кулачка, равный 180°. Более подробно данный вопрос представлен в работе [25].

Дифференцируя полученную функцию перемещений, находим кинематические характеристики центра ролика кулачкового механизма (рис. 2).

$$v(i) := \frac{d}{di}h(i);$$

скорости и ускорения:

$$v(i) := \left| \begin{array}{c} v(i) \, if \; 0 \le i \le \pi \\ -v(i-\pi) \, if \; \pi \le i \le 2\pi \\ 0 \, otherwise \end{array} \right. ;$$

$$a(i) := \frac{d}{di}v(i);$$

$$a1(i) := \left| \begin{array}{c} a(i) \, if \; 0 \le i \le \pi \\ -a(i-\pi) \, if \; \pi \le i \le 2\pi \\ 0 \, otherwise \end{array} \right. .$$

Рис. 2. Листинг программы для определения кинематических характеристик кулачкового механизма:

$v(i)$ – аналог скорости центра ролика; $h(i)$ –текущее значение перемещения центра ролика; $a(i)$ – дифференциал от $v(i)$; $a1(i)$ – аналог ускорений; $i = \varphi$ – угол поворота кулачка

Fig. 2. Program listing determining the kinematic characteristics of the cam mechanism:

$v(i)$ – roller center velocity analogue; $h(i)$ – current value of roller center displacement; $a(i)$ – differential of $v(i)$; $a1(i)$ – acceleration analogue; $i = \varphi$ – cam rotation angle

Этот алгоритм синтеза был использован и для дальнейших расчетов, но с изменением некоторых входящих параметров, которые не влияют на программу, но приводят к изменению кинематических характеристик структурных групп. Значения и характер изменения аналогов скоростей показаны на рис. 3.

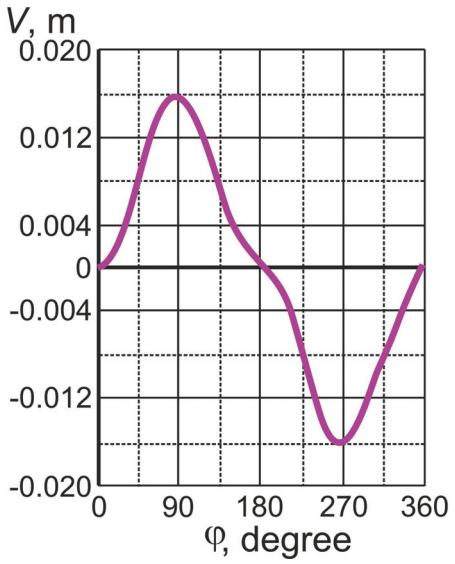


Рис. 3. Аналоги скоростей центра ролика кулачкового механизма

Fig. 3. Cam roller center velocity analogs

Размер коромысла задан из расчета конструктивных параметров ролика, его оси, а также размеров ступицы. Максимальный угол давления выбран с учетом коэффициента полезного действия всего механизма. Для определения недостающих размеров кулачкового механизма производим разметку положения точки A коромысла *3*. Далее на лучах, соединяющих точку O_1 и точку A, откладываем отрезки, равные значениям аналогов скоростей в определенные промежутки углов поворота (рис. 4). Разметку производим как для фазы подъема, так и для фазы опускания. В нашем случае приведено 8 значений, которые определили годограф аналогов скоростей точки A механизма.

Проведя касательные к точкам A под углом 90° $-\delta_{max}$, получили семейство касательных, образующих заштрихованную область на рис. 4, которая и будет определять положение точки оси для кулачка. На рис. 4 приведена точка пересечения касательных только для случая максимальных аналогов скоростей. Тогда расстояние от точки O до начала траектории движения центра ролика будет равно минимальному радиусу кулачка $\rho_{min} = R = 90$ мм. Получив основные параметры для кулачкового механизма, можно приступить к синтезу кулисной группы. Параме-

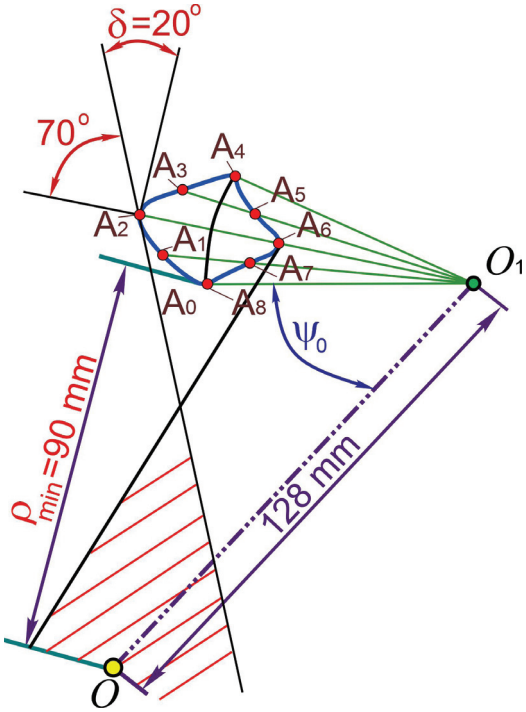


Рис. 4. К определению недостающих параметров кулачкового механизма

Fig. 4. To determine the missing parameters of the cam mechanism

трический синтез группы Ассура второго класса третьего вида предлагается начать с определения входных параметров и условий, которые должны быть при этом поставлены. Кинематические характеристики этой группы зависят от размеров коромысла L, угла его расположения по отношению к плечу коромысла кулачковой группы θ, который необходимо определить из условия, что в момент входа сухаря в паз кулисы угол $O_1BO_2 = 90°$ (см. рис. 1).

Приняв размер плеча, на котором расположен сухарь, равным $L = 60$ мм, определили угол между плечами коромысла θ, для чего необходимо рассмотреть схему механизма, приведенную на рис. 1.

Тогда

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a^2 + L^2 - \rho^2}{2LA}\right). \quad (2)$$

Угол

$$\beta = \arccos\left(\frac{L}{a}\right). \quad (3)$$

Суммарный угол, определяемый углом разворота плеч коромысла, определится уравнением:

$$\theta = \alpha + \beta. \quad (4)$$

В результате расчетов суммарный угол составил θ = 103°.

Угол качания кулисы определится следующим образом:

$$OB = \sqrt{a^2 + O_1B^2 - 2aO_1B\cos(\beta)}, \quad (5)$$

и

$$O_1B^2 = a^2 + OB^2 - 2aOB\cos(\psi), \quad (6)$$

$$\psi = \arccos\left(\frac{a^2 + OB^2 - O_1B^2}{2aOB}\right). \quad (7)$$

Таким образом, в результате синтеза механизма были определены основные размеры: межосевое расстояние $a = OO_1 = 128$ мм; угол размаха коромысла θ = 103°; начальный угол, обеспечивающий вход сухаря в кулису $O_1BO_2 = 90°$; начальный угол кулачкового механизма

$$\psi_0 = 47°.$$

Качественные характеристики перемешивания смеси будем определять в соответствии с формулой, приведенной в [40]:

$$\mu = \mu_0 e^{-kV}, \quad (8)$$

где μ – приведенный угол застойной зоны; μ_0 – коэффициент трения смеси о лопасть в статических условиях; e – основание натурального логарифма; k – экспериментальный коэффициент; V – окружная скорость лопасти, которую можно определить согласно уравнению

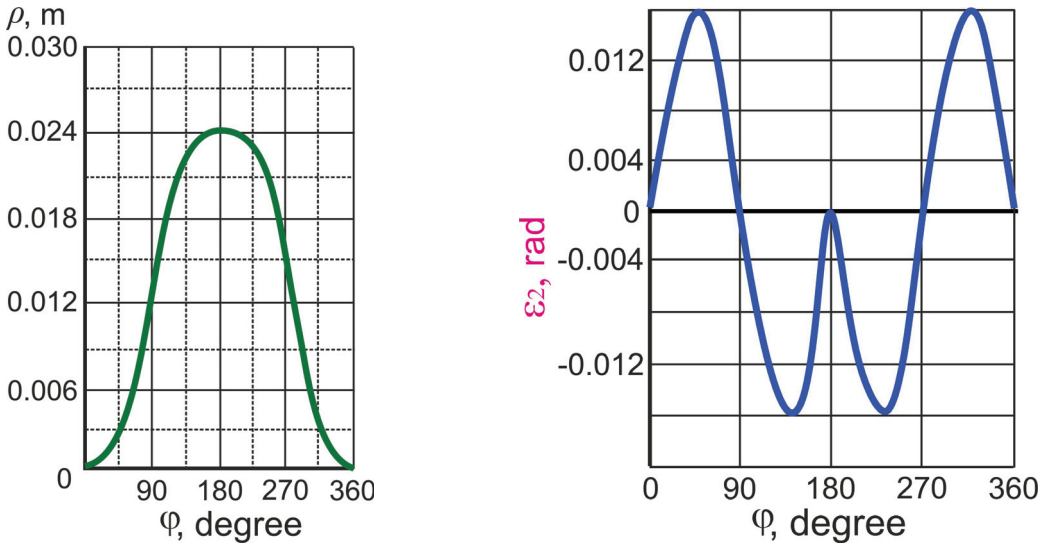
$$V = 5\sin(\omega t)L_л, \quad (9)$$

где ω – угловая частота вращения кривошипа; $L_л$ – длина лопасти.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 2, рассчитаны аналоги кинематических характеристик центра ролика для кулачкового механизма (рис. 5).

При синтезе кулачкового механизма было рассмотрено несколько таких вариантов. Анализ показал, что выбранные параметры данного механизма влияют главным образом на амплитудные значения кинематических характеристик,



а *б*

Рис. 5. Кинематические характеристики центра ролика кулачкового механизма:

а – перемещения; *б* – ускорения

Fig. 5. Kinematic characteristics of the center of the roller for the cam mechanism:

а – displacement; *б* – acceleration

но при этом они остаются плавными и непрерывными, без скачков. Поэтому принято решение, что дальнейшие исследования проводить на общей приведенной модели механизма, которая позволит дать оценку синтезу кулачково-кулисного механизма в части выбора его размеров и кинематических характеристик.

Предлагаем несколько вариантов синтеза для этого механизма. Для наглядности проанализируем влияние различных параметров на изменения кинематических характеристик выходного звена – кулисы.

Вариант 1. Параметры механизма имеют следующие значения: $a = OO_1 = 0{,}128$ м; величина минимального радиуса кулачка $\rho_{min} = 0{,}09$ м; плечи $L = O_1A = O_1B = 0{,}06$ м; угол размаха коромысла $\theta = 103°$. В этом случае изменения теоретических значений радиусов-векторов кулачка показаны на графике (рис. 6).

Характер изменения угла качания для кулисы представлен на рис. 7, аналог угловых ускорений – на рис. 8.

Как видно из графиков, изображенных на рис. 7 и 8, углы качания и ускорения имеют гладкие и непрерывные функции без осцилляций. На рис. 7 и 8 наблюдаются выстои в начале и конце графиков. Суммарная величина их составляет около 80°.

Вариант 2. Проведем изменение одного размера звена механизма. Для этого примем мини-

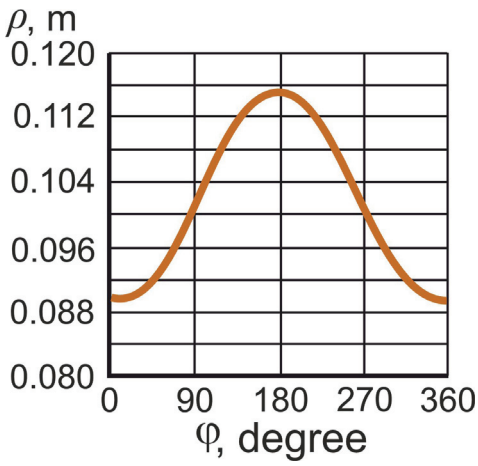


Рис. 6. График изменения численных значений радиусов-векторов при $\rho_{min} = 90$ мм:

ρ –значения радиусов-векторов кулачка; φ – углы поворота кулачка

Fig. 6. Graph of the change in the numerical values of the radius vectors at $\rho_{min} = 90$ mm:

ρ – cam radius vector values; φ – cam rotation angles

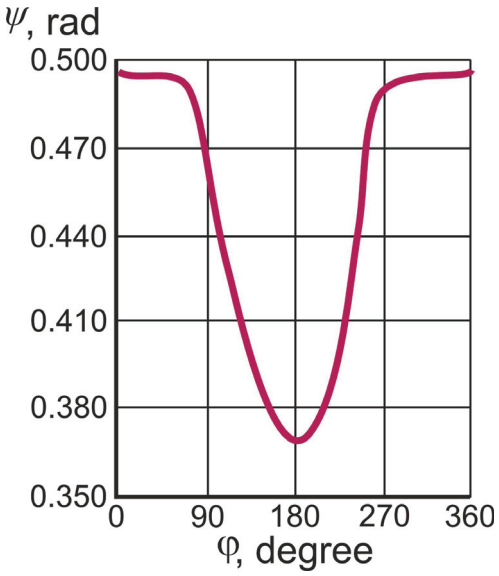


Рис. 7. График угла качания кулисы ψ:
φ – угол поворота кулачка

Fig. 7. Rocker swing angle graph ψ:
φ – cam rotation angle

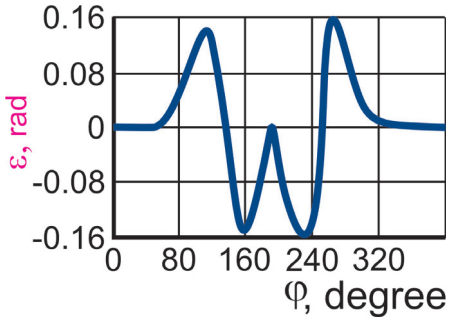


Рис. 8. График угловых ускорений кулисы

Fig. 8. Graph of rocker angular accelerations

мальный радиус кривизны ρ_{min} = 70 мм. Остальные размеры оставляем такими, как в варианте 1. Проведем кинематический расчет. В этом случае значения кинематических характеристик можно увидеть на графиках: значения радиусов-векторов кулачка показаны на рис. 9, а значения углов качания кулисы и аналоги угловых ускорений – на рис. 10 и 11 соответственно.

Как видно из графиков, представленных на рис. 10 и 11, углы качания и аналоги ускорений имеют гладкие и непрерывные функции без осцилляций. На графиках (рис. 10 и 11) хорошо определяются выстои в начале и в конце этих графиков. Величина выстоя составляет около 80°.

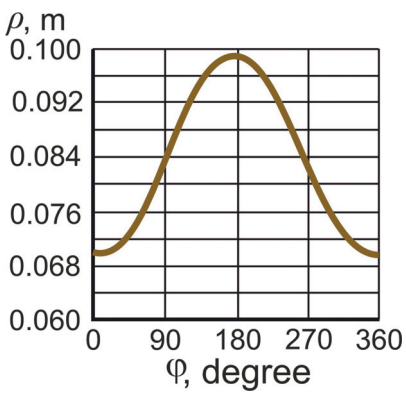
Вариант 3. Проведем изменение одного размера звена механизма: ρ_{min} = 50 мм. Остальные размеры оставляем такими, как в варианте 1. Проведем кинематический расчет. В этом случае значения радиусов-векторов кулачка можно увидеть на графике, показанном на рис. 12. При этом график угла качания кулисы представлен на рис. 13.

Для кулисы закономерность изменения угла качания не отвечает одному из главных критериев синтеза: нет плавности и непрерывности графиков угла качания и выраженного закона изменения угла качания. Начало графика смещено более чем на 100° от начала координат, а заканчивается он примерно на 245° оборота кулачкового вала (рис. 13).

Как видно из приведенного варианта, законы изменения кинематических параметров для кулачково-кулисного механизма не удовлетворяют поставленным задачам синтеза. Было рассмотрено еще несколько вариантов. Результаты теоретических расчетов сведены в таблицу.

Рис. 9. График изменения численных значений радиусов-векторов при ρ_{min} = 70 мм:
ρ – радиусы-векторы кулачка; φ – углы поворота кулачка

Fig. 9. Graph of the change in the numerical values of the radius vectors at ρ_{min} = 70 mm:
ρ – cam radius vector values; φ – cam rotation angles



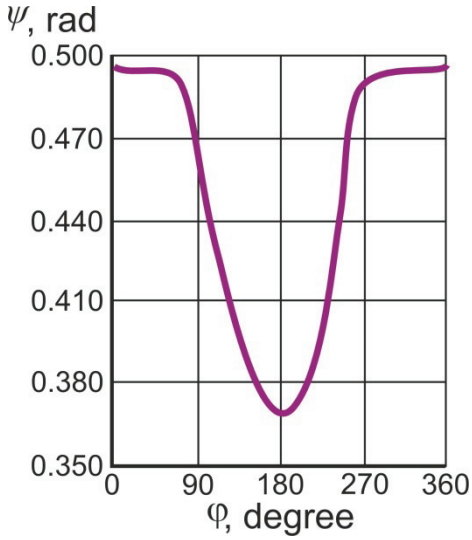


Рис. 10. График изменения угла качания кулисы ψ при ρ_{min}=70 мм

Fig. 10. Graph of the change in the swing angle of the rocker ψ at ρ_{min} = 70 mm

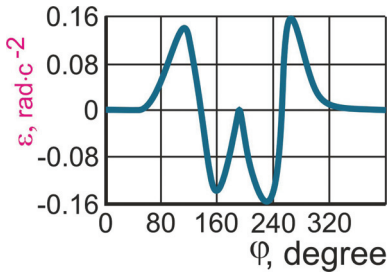


Рис. 11. График изменения ускорений кулисы при ρ_{min}=70 мм

Fig. 11. Graph of the change in the accelerations of the rocker at ρ_{min} = 70 mm

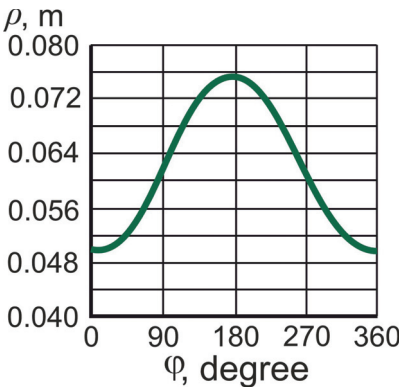


Рис. 12. График изменения численных значений радиусов-векторов при ρ_{min} = 50 мм

Fig. 12. Graph of the change in the numerical values of the radius vectors at ρ_{min} = 50 mm

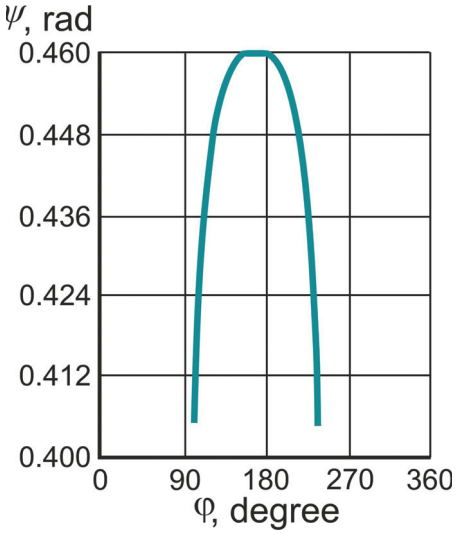


Рис. 13. График изменения угла качания кулисы ψ при ρ_{min} =50 мм

Fig. 13. Graph of the change in the rocker swing angle ψ at ρ_{min} = 50 mm

Результаты теоретических расчетов синтеза кулачково-кулисного механизма
The results of theoretical calculations for the synthesis of the cam-rocker mechanism

№ п/п / No.	H, м / H, m	a, м / a, m	L, м / L, m	ρ_{min}, м / ρ_{min}, m	θ, град. / θ, deg.	Аналог углового ускорения ε, c^{-2} / Analogue of the angular acceleration ε, s^{-2}	Аналог угловой скорости ω, c^{-1} / Analog of the angular velocity ω, s^{-1}	Характеристика кривых, град. / Characteristics of curves, deg.
1	0,025	0,128	0,06	0,09	103	–0,160	0,098	Выстой ≈ 80 / Dwell ≈ 80
2	0,025	0,128	0,06	0,07	103	–0,172	0,101	Выстой ≈ 80 / Dwell ≈ 80
3	0,025	0,128	0,06	0,05	103	–	–	Разрывы функций / Discontinuities of function
4	0,025	0,128	0,08	0,09	103	0,046	0,067	Нет выстоя / No dwell
5	0,025	0,128	0,09	0,09	103	0,040	0,060	Нет выстоя / No dwell /
6	0,025	0,130	0,06	0,09	103	0,055	0,040	Нет выстоя / No dwell
7	0,025	0,140	0,06	0,08	103	0,024	0,018	Нет выстоя / No dwell
8	0,025	0,128	0,06	0,09	110	0.040	0,024	Нет выстоя / No dwell
9	0,025	0,128	0,06	0,08	120	0,172	0,10	Выстой ≈ 80 / Dwell ≈ 80
10	0,025	0,128	0,06	0,09	105	0,174	0,12	Выстой ≈ 80 / Dwell ≈ 80

Используя аналитические зависимости (1)–(9) и задавая некоторые численные значения для отдельных параметров механизма привода, рассчитали угол разворота коромысла θ. Кроме того, принимали во внимание плавность и непрерывность графиков кинематических характеристик и наличие выстоя ведомого звена кулачково-кулисного механизма, имеющего кинематическую связь с рабочим валом машины.

Качество смеси можно оценить в соответствии с выражением (8). Имея численные значения коэффициента трения смеси $\mu_0 = 0{,}789$ и скорость, определенную согласно (9), получим максимальное значение суммарного угла 0,9, а минимальное – 0,6.

Заключение

Основной целью, которая была поставлена в работе, является улучшение качества перерабатываемого продукта, которое было получено за счет разработанного механизма, включающего синтез кулачковой и кулисной групп, обеспечивающих необходимую степень подвижности и размеры звеньев.

Так, для кулачкового механизма рациональные параметры звеньев составляют: межосевое расстояние $a = OO_1 = 128$ мм; угол размаха коромысла θ = 103°; начальный угол $\psi_0 = 47°$ при заданных размерах коромысла $L = 60$ мм, диаметре ролика, равном 60 мм, и использование закона движения центра ролика по циклоиде с углом кривой β = 180° и ходом $H = 25$ мм.

Для получения выстоя рабочего вала машины синтез кулисной группы обеспечил угол начального положения сухаря и кулисы, равный $O_1BO_2 = 90°$.

Качество смеси оценивали по углу застойной зоны, который образуется при движении сыпучего материала. В статических условиях он равен 0,846, а при переменной угловой ско-

рости 0,550. Кроме того, инерционные силы, которые в нашем случае будут менять знак четыре раза за один цикл, обеспечат встряхивание и отскок крошкообразной массы от лопастей. Все эти мероприятия позволят повысить качество смеси.

Список литературы

1. Topology and dimension synchronous optimization design of 5-DoF parallel robots for in-situ machining of large-scale steel components / K. Chen, M. Wang, X. Huo, P. Wang, T. Sun // Mechanism and Machine Theory. – 2023. – Vol. 179. – P. 105105. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105105.

2. *Flores P., Souto A.P., Marques F.* The first fifty years of the Mechanism and Machine Theory: Standing back and looking forward // Mechanism and Machine Theory. – 2018 – Vol. 125. – P. 8–20. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.11.017.

3. *Hsieh J.-F.* Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes // Mechanism and Machine Theory. – 2014. – Vol. 81. – P. 155–165. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.

4. *Eckhardt H.D.* Kinematic design of machines and mechanisms. – 1st ed. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 620 p. – ISBN 0070189536. – ISBN 978-0070189539.

5. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review / B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, R. Wang // Mechanism and Machine Theory. – 2012. – Vol. 143. – P. 103622. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.

6. *Erdman A.G., Sandor G.N.* Mechanism design: analysis and synthesis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2001. – 688 p. – ISBN 0130408727. – ISBN 978-0130408723.

7. *Мудров А.Г.* Конструкции и модель смешения в аппаратах с мешалкой // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 1 (43). – С. 226–233.

8. *Демин О.В.* Анализ работы различных видов смесителей сыпучих материалов периодического действия // Труды ТГТУ: сборник научных статей молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2001. – Вып. 8. – С. 109–114.

9. Авторское свидетельство № 1253560 А1 СССР, МПК А21С 1/06. Тестомесильная машина: № 3770602: заявл. 11.07.1984: опубл. 30.08.1986, Бюл. № 32 / Г.В. Церцвадзе, Н.К. Залдастанишвили, З.С. Нацвлишвили; заявитель Грузинский политехнический институт.

10. Патент № 2455826 С1 Российская Федерация, МПК А21С 1/06. Тестомесильная машина непрерывного действия: № 2011105541/12: заявл. 14.02.2011: опубл. 20.07.2012 / Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Войнова Е.В.; заявитель Новосибирский государственный технический университет.

11. Патент № 2752158 С1 Российская Федерация, МПК А21С 1/06. Тестомесильная машина непрерывного действия: № 2020140014: заявл. 07.12.2020: опубл. 23.07.2021 / Подгорный Ю.И., Кириллов А.В., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Огородников В.А.; заявитель Новосибирский государственный технический университет.

12. *Perez A., McCarthy J.M.* Dimensional synthesis of Bennett linkages // ASME. Journal of Mechanical Design. – 2003. – Vol. 125, iss. 1. – P. 98–104. – DOI: 10.1115/1.1539507.

13. *Myszka D.H.* Machines and mechanisms: applied kinematic analysis. – 4th ed. – Pearson, 2012. – 576 p. – ISBN 0-13-215780-2. – ISBN 978-0-13-215780-3.

14. *Rao J.S., Dukkipati R.V.* Mechanism and machine theory. – 2nd ed. – New Delhi: New Age International, 2008. – 600 p. – ISBN 812240426X. – ISBN 978-8122404265.

15. *Youssef H.A., El-Hofy H.* Machining technology: machine tools and operations. – Hoboken: Taylor & Francis Group, 2008. – 672 p. – ISBN 9781420043396.

16. *Shabana A.A.* Dynamic of multibody systems. – 4th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 393 p. – ISBN 978-1107042650. – ISBN 1107042658.

17. Advanced theory of mechanisms and machines / M.Z. Kolovsky, A.N. Evgrafov, Yu.A. Semenov, A.V. Slousch. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2000. – 396 p. – (Foundations of Engineering Mechanics). – ISBN 978-3-642-53672-4. – eISBN 978-3-540-46516-4. – DOI: 10.1007/978-3-540-46516-4.

18. *Astashev V.K., Babitsky V.I., Kolovsky M.Z.* Dynamics and control of machines. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2000. – 235 p. – ISBN 978-3-642-53698-4. – eISBN 978-3-540-69634-6. – DOI: 10.1007/978-3-540-69634-6.

19. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с. – ISBN 5-02-013810-X.

20. *Hendrickson C.T., Janson B.N.* A common network flow formulation for several civil engineering problems // Civil Engineering Systems. – 1984. – Vol. 1, iss. 4. – P. 195–203. – DOI: 10.1080/02630258408970343.

21. *Battarra M., Mucchi E.* Analytical determination of the vane radial loads in balanced vane pumps // Mechanism and Machine Theory. – 2020. – Vol. 154. – P. 104037. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104037.

22. *Neugebauera R., Denkena B., Wegener K.* Mechatronic systems for machine tools // CIRP Annals. – 2007. – Vol. 56, iss. 2. – P. 657–686. – DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.007.

23. *Novotný P., Jonák M., Vacula J.* Evolutionary optimisation of the thrust bearing considering multiple

operating conditions in turbomachinery // International Journal of Mechanical Sciences. – 2021. – Vol. 195. – P. 106240. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106240.

24. A practical approach to motion control for varying inertia systems / T. Kaipio, L. Smelov, C. Morgan, N. Leighton // Progress in system and robot analysis and control design / ed. by S.G. Tzafestas, G. Schmidt. – London: Springer, 1999. – P. 195–204. – (Lecture Notes in Control and Information Sciences; vol. 243). – DOI: 10.1007/BFb0110545.

25. *Rothbart H.A.* Cam design handbook. – New York: McGraw-Hill Professional, 2003. – 606 p. – ISBN 0071377573. – ISBN 978-0875841830.

26. Проектирование кулачкового механизма с учетом технологической нагрузки и энергетических затрат / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, П.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 2. – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.

27. Синтез закона движения механизма прибоя уточных нитей станка СТБ с приводом от кулачков / Ю.И. Подгорный, А.В. Кириллов, В.Ю. Иванцивский, Д.В. Лобанов, О.В. Максимчук // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 47–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-47-58.

28. *Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю.* К вопросу об ограничении неравномерности движения технологической машины в заданных пределах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 67–77. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-67-77.

29. *Vulfson I.* Dynamics of cyclic machines. – Cham: Springer International, 2015. – 390 p. – (Foundations of Engineering Mechanics). – ISBN 978-3-319-12633-3. – eISBN 978-3-319-12634-0. – DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

30. *Ondrášek J.* The synthesis of a hook drive cam mechanism // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 92. – P. 320–329. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.

31. *Mott R.L.* Machine elements in mechanical design. – 5th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013. – 816 p. – ISBN 0135077931. – ISBN 978-0135077931.

32. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series / C. Zhou, B. Hu, S. Chen, L. Mac // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Vol. 104. – P. 118–129. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

33. Theoretical analysis of compliance and dynamics quality of a lightly loaded aerostatic journal bearing with elastic orifices / V. Kodnyanko, S. Shatokhin, A. Kurzakov, Y. Pikalov // Precision Engineering. – 2021. – Vol. 68. – P. 72–81. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.11.012.

34. *Xu L.X., Chen B.K., Li C.Y.* Dynamic modelling and contact analysis of bearing-cycloid-pinwheel transmission mechanisms used in joint rotate vector reducers // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – Vol. 137. – P. 432–458. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.035.

35. A semi-analytical load distribution model for cycloid drives with tooth profile and longitudinal modifications / T. Zhang, X. Li, Y. Wang, L. Sun // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 14. – P. 4859. – DOI: 10.3390/app10144859.

36. Robust design optimization of the vibrating rotor-shaft system subjected to selected dynamic constraints / R. Stocki, T. Szolc, P. Tauzowski, J. Knabel // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2012. – Vol. 29. – P. 34–44. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.07.023.

37. *Fomin A., Paramonov M.* Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 871–877. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.

38. To the theory of mechanisms subfamilies / A. Fomin, L. Dvornikov, M. Paramonov, A. Jahr // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124. – P. 012055. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.

39. Algorithm for determining the unbalances of continuous mixers rotors / Yu.I. Podgornyj, T.G. Martynova, V.Yu. Skeeba, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1061. – P. 012071. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012071.

40. *Першин В.Ф., Пасько А.А., Демин О.В.* Моделирование движения пластины в сыпучем материале // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 444–449.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 71–84
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-71-84

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Synthesis of the drive mechanism of the continuous production machine

Yuriy Podgornyj[1, 2, a, *], *Alexander Kirillov*[1, 3, b], *Vadim Skeeba*[1, c], *Tatyana Martynova*[1, d], *Dmitry Lobanov*[4, e], *Nikita Martyushev*[5, f]

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2] Novosibirsk Technological Institute (branch) A.N. Kosygin Russian State University (Technologies, Design, Art), 35 Krasny prospekt (5 Potaninskayast), Novosibirsk, 630099, Russian Federation
[3] Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskayast., Novosibirsk, 630126, Russian Federation
[4] I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation
[5] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-1664-5351, pjui@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-8142-2787, kirillovalvs@mail.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-5811-5519, martynova@corp.nstu.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru, [f] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 December 2022
Revised: 14 January 2023
Accepted: 25 January 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Type synthesis of a mechanism
Assur groups
Parametric synthesis of a mechanism
Kinematic scheme
Cam-rocker mechanism
Kinematic parameters
Friction ratio
Friction angle

Funding
This study was supported by a NSTU grant (project No. TP-PTM-1_23).

Acknowledgements
Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Existing mixing devices operate at a constant angular velocity of the working body. During this process, there are zones in which there may be no movement of material, which leads to a decrease in the quality of the finished product. When the working body moves with a variable angular rate, the inertia forces, when changing its sign, contribute to the creation of conditions under which the mixture will lose contact with the blade and move to new levels of movement, and this helps to improve the quality and intensity of the mixing process. The *purpose of the work* is to improve the quality of the processed mixture on horizontal blade (kneading) machine. **Methods**. Theoretical studies are carried out using the basic provisions of the theory of machines and mechanisms, structural and parametric synthesis, kinematic analysis, mathematical and computer simulation. **Results and discussion**. In accordance with the proposed method, the synthesis of the cam-rocker mechanism is carried out, which made it possible to select the main dimensions for the cam mechanism: the minimum radius and center distance. For the synthesis of the rocker group, the parameters of the synthesized cam mechanism are used and, using the main parameters for the rocker group (the size of the input link, the angle of the second arm initial position and rocker centre line, equal to 90°). The rocker arm span angle is obtained equal to 103°. As a result of the kinematic calculation, it is found that the dwell time of the working shafts is within 80°. The quality of the mixture can be assessed by the angle of the stagnation zone, which is formed during the movement of granular material. Under static conditions, it is equal to 0.846°, and at variable angular rate – 0.550°. It is theoretically confirmed that inertial forces that change sign four times in one cycle will provide shaking and rebound of the mixed mass from the blades, which, in turn, will significantly improve the quality of the mixture.

For citation: Podgornyj Yu.I., Kirillov A.V., Skeeba V.Yu., Martynova T.G., Lobanov D.V., Martyushev N.V. Synthesis of the drive mechanism of the continuous production machine. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 71–84. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-71-84. (In Russian).

*** Corresponding author**
Podgornyj Yuriy I., D.Sc. (Engineering), Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel: +7 (383) 346-17-79, **e-mail:** pjui@mail.ru

References

1. Chen K., Wang M., Huo X., Wang P., Sun T. Topology and dimension synchronous optimization design of 5-DoF parallel robots for in-situ machining of large-scale steel components. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, vol. 179, p. 105105. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105105.

2. Flores P., Souto A.P., Marques F. The first fifty years of the Mechanism and Machine Theory: Standing back and looking forward. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, vol. 125, pp. 8–20. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.11.017.

3. Hsieh J.-F. Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, vol. 81, pp. 155–165. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.

4. Eckhardt H.D. *Kinematic design of machines and mechanisms*. 1st ed. New York, McGraw-Hill, 1998. 620 p. ISBN 0070189536. ISBN 978-0070189539.

5. Zhu B., Zhang X., Zhang H., Liang J., Zang H., Li H., Wang R. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, vol. 143, p. 103622. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.

6. Erdman A.G., Sandor G.N. *Mechanism design: analysis and synthesis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2001. 688 p. ISBN 0130408727. ISBN 978-0130408723.

7. Mudrov A.G. Konstruktsii i model' smesheniya v apparatakh s meshalkoi [Design and model mixing in the apparatus with stirrer]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, 2018, no. 1, pp. 226–233.

8. Demin O.V. [Analysis of the operation of various types of mixers for bulk materials of periodic action]. *Trudy TGTU: sbornik nauchnykh statei molodykh uchenykh i studentov* [Proceedings of TSTU: Collection of scientific articles of young scientists and students]. Tambov, 2001, iss. 8, pp. 109–114.

9. Tsertsvadze G.V., Zaldastanishvili N.K., Natsvlishvili Z.S. *Testomesil'naya mashina* [Dough mixer]. Inventor's Certificate USSR, no. 1253560, 1986.

10. Podgornyj J.I., Martynova T.G., Vojnova E.V. *Testomesil'naya mashina nepreryvnogo deistviya* [Continuous action dough kneading machine]. Patent RF, no. 2455826, 2012.

11. Podgornyi I.I., Kirillov A.V., Skeeba V.Iu., Martynova T.G., Ogorodnikov V.A. *Testomesil'naya mashina nepreryvnogo deistviya* [Continuous kneading machine]. Patent RF, no. 2752158, 2021.

12. Perez A., McCarthy J.M. Dimensional synthesis of Bennett linkages. *ASME. Journal of Mechanical Design*, 2003, vol. 125, iss. 1, pp. 98–104. DOI: 10.1115/1.1539507.

13. Myszka D.H. *Machines and mechanisms: applied kinematic analysis*. 4th ed. Pearson, 2012. 576 p. ISBN 0-13-215780-2. ISBN 978-0-13-215780-3.

14. Rao J.S., Dukkipati R.V. *Mechanism and machine theory*. 2nd ed. New Delhi, New Age International, 2008. 600 p. ISBN 812240426X. ISBN 978-8122404265.

15. Youssef H.A., El-Hofy H. *Machining technology: machine tools and operations*. Hoboken, Taylor & Francis Group, 2008. 672 p. ISBN 9781420043396.

16. Shabana A.A. *Dynamic of multibody systems*. 4th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 393 p. ISBN 978-1107042650. ISBN 1107042658.

17. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. *Advanced theory of mechanisms and machines*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer, 2000. 396 p. *Foundations of Engineering Mechanics*. ISBN 978-3-642-53672-4. eISBN 978-3-540-46516-4. DOI: 10.1007/978-3-540-46516-4.

18. Astashev V.K., Babitsky V.I., Kolovsky M.Z. *Dynamics and control of machines*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer, 2000. 235 p. ISBN 978-3-642-53698-4. eISBN 978-3-540-69634-6. DOI: 10.1007/978-3-540-69634-6.

19. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. ISBN 5-02-013810-X.

20. Hendrickson C.T., Janson B.N. A common network flow formulation for several civil engineering problems. *Civil Engineering Systems*, 1984, vol. 1, iss. 4, pp. 195–203. DOI: 10.1080/02630258408970343.

21. Battarra M., Mucchi E. Analytical determination of the vane radial loads in balanced vane pumps. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, vol. 154, p. 104037. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104037.

22. Neugebauera R., Denkena B., Wegener K. Mechatronic systems for machine tools. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56, iss. 2, pp. 657–686. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.007.

23. Novotný P., Jonák M., Vacula J. Evolutionary optimisation of the thrust bearing considering multiple operating conditions in turbomachinery. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 195, p. 106240. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106240.

24. Kaipio T., Smelov L., Morgan C., Leighton N. A practical approach to motion control for varying inertia systems. *Progress in system and robot analysis and control design*. Ed. by S.G. Tzafestas, G. Schmidt. London, Springer, 1999, pp. 195–204. DOI: 10.1007/BFb0110545.

25. Rothbart H.A. *Cam design handbook*. New York, McGraw-Hill Professional, 2003. 606 p. ISBN 0071377573. ISBN 978-0875841830.

26. Podgornyj Yu.I., Skeeba V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Skeeba P.Yu. Proektirovanie kulachkovogo mekhanizma s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki i energeticheskikh zatrat [Cam mechanism designing with account of the technological load and energy costs]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 2, pp. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.

27. Podgornyj Yu.I., Kirillov A.V., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Maksimchuk O.V. Sintez zakona dvizheniya mekhanizma priboya utochnykh nitei stanka STB s privodom ot kulachkov [Synthesis of the motion law of filling threads beat-up mechanisms of the STB loom with cam driven]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 47–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-47-58.

28. Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu. K voprosu ob ogranichenii neravnomernosti dvizheniya tekhnologicheskoi mashiny v zadannykh predelakh [On the issue of limiting the irregular motion of a technological machine within specifed limits]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 67–77. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-67-77.

29. Vulfson I. *Dynamics of cyclic machines*. Cham, Springer International, 2015. 390 p. *Foundations of Engineering Mechanics*. ISBN 978-3-319-12633-3. eISBN 978-3-319-12634-0. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

30. Ondrášek J. The synthesis of a hook drive cam mechanism. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 92, pp. 320–329. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.

31. Mott R.L. *Machine elements in mechanical design*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2013. 816 p. ISBN 0135077931. ISBN 978-0135077931.

32. Zhou C., Hu B., Chen S., Mac L. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 104, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

33. Kodnyanko V., Shatokhin S., Kurzakov A., Pikalov Y. Theoretical analysis of compliance and dynamics quality of a lightly loaded aerostatic journal bearing with elastic orifices. *Precision Engineering*, 2021, vol. 68, pp. 72–81. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.11.012.

34. Xu L.X., Chen B.K., Li C.Y. Dynamic modelling and contact analysis of bearing-cycloid-pinwheel transmission mechanisms used in joint rotate vector reducers. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 137, pp. 432–458. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.035.

35. Zhang T., Li X., Wang Y., Sun L. A semi-analytical load distribution model for cycloid drives with tooth profile and longitudinal modifications. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 14, p. 4859. DOI: 10.3390/app10144859.

36. Stocki R., Szolc T., Tauzowski P., Knabel J. Robust design optimization of the vibrating rotor-shaft system subjected to selected dynamic constraints. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 29, pp. 34–44. DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.07.023.

37. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 871–877. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.

38. Fomin A., Dvornikov L., Paramonov M., Jahr A. To the theory of mechanisms subfamilies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, p. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.

39. Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Lobanov D.V., Martyushev N.V. Algorithm for determining the unbalances of continuous mixers rotors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1061, p. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012071.

40. Pershin V.F., Pas'ko A.A., Demin O.V. Modelirovanie dvizheniya plastiny v sypuchem materiale [Modeling of plate movement in the granular material]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 444–449.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 85–97
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Методика критериального анализа мультивариантных систем

Дмитрий Лобанов [a, *], *Олеся Рафанова* [b]

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-0560-4730, olesya-karamaeva89@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

История статьи:
Поступила: 05 декабря 2022
Рецензирование: 14 января 2023
Принята к печати: 25 января 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Анализ
Сравнение
Мультивариантные системы
Эффективность производства
Организация производства
Автоматизация
Качество

Благодарности:
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Тенденции развития и применения современных машиностроительных систем так или иначе создают проблему анализа и выбора в случае наличия альтернатив объектов или же при большом количестве критериев сравнения – показателей эффективности объектов или систем. Основные трудности оптимизации решения проектирования производственных систем зависят от сложных технологических задач – большого количества влияющих факторов и отсутствия закономерностей. Выбор эффективных объектов и систем – зачастую сложный и многокритериальный процесс, требующий больших затрат времени и, как следствие, снижающий эффективность организации подготовки производства. В связи с этим для подготовки и принятия различных по сложности технико-экономических решений в условиях производства необходим системный подход с использованием наиболее рациональных форм и методов организации производства. **Цель работы** – создание обобщенной методики критериального анализа мультивариантных систем. **Методика исследований**. Предложена методика, направленная на повышение эффективности организации подготовки производства за счет обоснованного выбора из большого числа вариантов. Выбор рационального варианта решения основывается на ранжировании показателей по приоритетности на момент принятия обоснованного решения конкретной ситуации и вида рассматриваемого объекта и системы. Показатели могут быть переменными с учетом специфики производства. **Результаты и их обсуждение.** В качестве примера практического применения предлагаемой методики проведем сравнительный анализ процесса лезвийной обработки полимерного композиционного материала стеклотекстолит СТЭФ-1 сборной фрезой, оснащенной различными инструментальными материалами. В качестве параметров сравнения взяты период технологической стойкости инструмента, производительность лезвийной обработки и приведенные затраты при реализации лезвийной обработки. По результатам сравнительного мультикритериального анализа, проведенного по представленной методике, следует вывод, что приоритетом в рассматриваемой системе с оговоренными параметрами реализации технологии является конструкция, оснащенная сплавом ВК3М, у которой наблюдается наибольшее значение весового критериального коэффициента. По результатам анализа близким по рациональности является инструмент, оснащенный сплавом марки ВК6ОМ, что позволяет рекомендовать его в качестве аналога при выборе. Область предполагаемого применения методики видится при необходимости анализа сложных мультивариантных систем/объектов. В качестве объектов/систем могут выступать как варианты научных решений при различных условиях сопоставимости, так и конструкторские, технологические решения, конструкционные и инструментальные материалы на стадии выбора при конструкторской и технологической подготовке производства, варианты алгоритма реализации систем. Параметрами сравнения могут быть физико-механические, технологические, эксплуатационные свойства, технико-экономические и качественные показатели, специфические характеристики и параметры. Предложенная методика позволит сократить время на принятие новых решений при варьируемых условиях производства. Использование методики при известных и четко определенных параметрах, характеризующих мультивариантные системы, позволяет алгоритмизировать, а в последующем и автоматизировать процесс организационно-технологической подготовки производства.

Для цитирования: *Лобанов Д.В., Рафанова О.С.* Методика критериального анализа мультивариантных систем // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 85–97. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97.

Введение

Тенденции развития и применения современных машиностроительных систем так или иначе создают проблему анализа и выбора в случае наличия альтернатив объектов или же при большом количестве критериев сравнения – показателей эффективности объектов или систем [1–10].

***Адрес для переписки**
Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
пр. Московский, 15,
428015, г. Чебоксары, Россия
Тел.: +7-908-303-47-45, **e-mail:** lobanovdv@list.ru

В связи с этим подготовительная стадия любой производственной системы имеет важнейшее значение для любого предприятия. Конкурентоспособность напрямую зависит от подходов к процессу функционирования производства как к обобщенной производственной системе, имеющей множество целевых функций, зависящих от различных факторов [11, 12]. Начальную оценку эффективности производственной системы необходимо произвести на стадии подготовки для дальнейшего принятия долгосрочных решений, которые, в свою очередь, напрямую влияют на размеры капиталовложений системы в целом. Основные сложности выбора оптимального варианта проектирования производственных систем зависят от сложных технологических задач – большого количества влияющих факторов и отсутствия закономерностей [13, 14].

Знание основ проектирования позволит выбрать наиболее рациональные варианты компоновки производственной системы и разработать алгоритмы управления для последующей автоматизация процесса подготовки и проектирования производственных систем с использованием математических методов. При проектировании производственной системы необходимо иметь базу данных с информацией, в которой будут необходимые данные о предметной области и которые будут представлять существующие связи и/или закономерности между элементами и свойствами объектов сравнения [15–21]. Наличие информации об объектах анализа позволит принимать обоснованные решения, на основе которых возможно моделирование системы, ее прогнозирование и оптимизация.

Особую актуальность это приобретает на стадии организационной или технологической подготовки производства, когда необходимо в сжатые сроки сделать обоснованный выбор из большого числа вариантов.

При этом стремятся получить на выходе экономическую и технологическую эффективность производства. Выбор эффективных объектов и систем зачастую сложный и многокритериальный процесс, требующий больших затрат времени и, как следствие, снижающий эффективность организации подготовки производства [22–26]. В реальных условиях индивидуально определяются признаки, по которым производится оценка, и выбирается оптимальный вариант решения. Учитывая, что показатели стремятся привести к экстремуму (повышению или понижению), а при обеспечении гибкости производства, с учетом специфики, когда ранжирование показателей по приоритетности может быть переменным, процесс критериального анализа еще усложняется. Целью работы является создание обобщенной методики критериального анализа мультивариантных систем, смысл которой заключается в выявлении параметров, которые наиболее важны в реальных условиях именно на момент принятия обоснованного решения, с последующим анализом по приоритетным параметрам.

Результат анализа системы должен быть направлен на обеспечение эффективности рассматриваемой системы в условиях принятых ограничений и приоритетов. Последовательность выбора оптимального варианта производственной системы определяется экономическими, техническими и организационными задачами. При проектировании необходимо понимать, что любые технологические решения могут и должны изменяться, регулироваться в ходе их реализации на исполнительном этапе производства. Сложность и трудоемкость всего процесса проектирования мультивариантных систем заключается в сопоставлении эффективности и рентабельности нескольких вариантов. При этом сравнение равноценных вариантов необходимо производить на каждом этапе проектирования. Степень углубленности и структура производственной системы зависят от типа производства.

Методика исследований

Для формализации задачи воспользуемся основами матричного анализа.

Обозначим через O_i объекты или системы сравнения, где i меняется от 1 до m, а m – количество объектов/систем сравнения. Параметры, характеризующие системы сравнения обозначим как P_j, где j меняется от 1 до n, а n – количество параметров, выбранных для сравнительного анализа. Таким образом, $O_i = O_1, O_2, \ldots O_m$; $P_j = P_1, P_2, \ldots P_n$; $P \in O$.

Так как критерии, как правило, имеют каждый свою размерность, то для удобства расчета матрицы с учетом приоритета минимального или максимального значения критерия предста-

вим элементы матрицы в виде кодированного безразмерного значения a_{ij}. Для кодирования необходимо ранжировать показатели P_j на те, которые предпочтительны в максимальном значении (требуется повышение) и те, которые предпочтительны в минимальном значении (требуется снижение).

Если для заданных условий сопоставимости максимальное значение критерия является более предпочтительным, то и элемент матрицы a_{ij} в кодированном виде примет безразмерное численное значение, равное модулю величины критерия $a_{ij} = \left|P_{ij}\right|$. В случае предпочтительности минимального значения критерия сравнения принимаем a_{ij} как безразмерное численное значение, равное модулю обратной величины критерия: $a_{ij} = \left|\frac{1}{P_{ij}}\right|$.

Для реализации методики составим матрицу смежности $M(a_{ij})$, строки которой будут отражать объекты или системы сравнения O_i, а столбцы – критерии P_j, характеризующие эти объекты или системы сравнения:

$$M(a_{ij}) = \begin{array}{c|ccccc} & P_1 & P_2 & P_3 & \dots & P_n \\ \hline O_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ O_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ O_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O_m & a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{mn}. \end{array} \quad (1)$$

Рекомендуемое построение матрицы позволит произвести сравнение, анализ и рациональный выбор объекта или системы с учетом проведенного ранее ранжирования параметров.

В дальнейшем критерии могут быть представлены как дискретными численными значениями, так и функциональными зависимостями $P = f(k_z)$ от параметров $k = \{k_1, k_2, \dots k_z\}$, которые к моменту принятия решений принимают конкретные значения в зависимости от выбранных пользователями ограничений, отвечающих условиям сопоставимости, характерным для организации производства. Выбор количества и состава параметров зависит от конкретной ситуации и вида рассматриваемого объекта или системы.

Следует отметить, что чем больше параметров, характеризующих анализируемые объекты, будет принято при расчете, тем обоснованнее будет произведен выбор рационального варианта решения.

Сформированная по приведенной выше методике матрица смежности позволяет произвести вычисление весового критериального коэффициента q_i для каждого i-го объекта или системы сравнения в отдельности:

$$q_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}. \quad (2)$$

Полученные в результате расчета значения формируются в результирующий вектор:

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_i \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Результирующий вектор позволяет наглядно судить о рациональности каждого из объектов сравнения, где максимальное значение q_i свидетельствует о большей приоритетности решения.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера практического применения предлагаемой методики проведем сравнительный анализ процесса лезвийной обработки полимерного композиционного материала стеклотекстолит СТЭФ-1 сборной фрезой, оснащенной различными инструментальными материалами.

Стеклотекстолит СТЭФ-1 представляет собой слоистый материал на основе стеклоткани, пропитанной эпоксифенольным связующим. Лезвийная обработка полимерных композитов, как правило, вызывает трудности в обеспечении требуемого качества обработанных поверхностей и физико-механических свойств деталей [27–32]. Это связано со структурой полимерных композитов и спецификой их поведения при механическом воздействии режущего лезвия. Процесс резания композитов отличается от резания металлических материалов, и применить общепринятые подходы при выборе лезвийного инструмента не всегда представляется возможным [27, 29].

При обработке резанием композиционных полимерных материалов инструментальные материалы должны обладать специфическими физико-механическими свойствами, высокой износостойкостью и твердостью, что обеспечивает работоспособность инструмента и увеличивает эффективность производства [33, 34].

Для проведения многокритериального анализа по предлагаемой методике приняты следующие допущения и ограничения. Конструкции инструментов (объекты сравнения O_i) имеют аналогичные конструктивные и геометрические параметры, выбранные на основе ранее проведенных исследований [27, 29, 33, 34], но отличаются материалом режущий части, оснащены следующими инструментальными материалами: ВК2, ВК8, ВК15, ВК3М, ВК6ОМ, Т5К10.

Согласно ранее проведенным исследованиям для совершенствования условий и снижения сроков организационной и технологической подготовки режущего инструмента при реализации технологии обработки изделий, достижения рациональной работоспособности инструмента в совокупности с обеспечением требуемого качества обработанной поверхности и интенсификации производительности обработки полимерных композиционных материалов рекомендуется применять:

1) высокопрочные инструментальные материалы для оснащения режущей части инструмента. Варианты инструментального материала указаны выше;

2) режимы резания при обработке композиционных материалов: подача на зуб S = = 0,15…0,17 мм/зуб, t = 0,5…0,6 мм, обороты n = 6 000 мин$^{-1}$, при данных значениях достигается максимальная (в пределах, которые допускается технологическим оборудованием) скорость резания;

3) геометрические параметры инструмента устанавливаются в пределах: передний угол $\gamma° = 15…20°$, задний угол $\alpha° = 10…15°$, угол заострения $\beta° = 55…60°$.

Стоимость твердосплавных пластин для фрез была получена от Кировоградского завода твердых сплавов. Стоимость фрез укрупненно рассчитана с учетом затрат на изготовление в лабораторных условиях.

Физико-механические свойства инструментальных материалов взяты справочно.

Исходные данные для анализа представлены в табл. 1.

Рациональный выбор инструментального материала для заданных условий предприятия на данный момент является обязательным этапом организации подготовки производства. В качестве критериев эффективности технологии лезвийной обработки полимерного композита выделим: работоспособность инструмента, производительность и экономичность.

Период стойкости является показателем работоспособности режущего инструмента. Определение этой величины зависит от достоверных значений для таких параметров технологического процесса, как технологические режимы резания, инструментальный материал, свойства материала заготовки, геометрические параметры инструмента. Принимая в качестве исходных данных результаты стойкостных испытаний инструмента при заданном сочетании материала заготовки и инструментального материала (экспериментальная система), возможно определить расчетную (прогнозируемую) стойкость режущего инструмента при любых иных сочетаниях материалов (расчетная система) в следующем виде [27]:

$$T = T_e K_T, \text{ мин}$$

где T_e – экспериментальный период стойкости при известном сочетании материалов, мин; K_T – коэффициент изменения периода стойкости, который зависит от сочетания в инструментальной системе физико-механических и эксплуатационных свойств материалов инструмента и заготовки, исследуемых (прогнозируемых) и полученных экспериментально ранее.

Полный расчет эффективности производительности и работоспособности инструмента производится по разработанной методике [27, 29]. При определении критерия экономичности необходимо выявить производственные затраты. Расчет экономического эффекта производится по разработанной методике [35].

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Рассмотрим условие производства, где необходима высокая работоспособность режущего инструмента и повышенная производительность обработки, и при этом нужно снизить производственные затраты. Следовательно,

Таблица 1
Table 1

Конструктивные параметры сравниваемых фрез
Form factors of compared cutters

Параметры	Значение параметра					
Код конструкции	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6
Материал режущей части	ВК2	ВК8	ВК15	ВК3М	ВК6ОМ	Т5К10
Диаметр фрезы, мм	250					
Стоимость фрезы, руб.	4 500					
Количество зубьев, шт.	4					
Число смен режущих элементов	50					
Ширина резания, мм	10					
Передний угол, γ°	20					
Задний угол, α°	12					
Время затачивания одного режущего элемента, мин	1,5					
Режимы резания	S = 0,15 мм/зуб, t = 0,5 мм, n = 6 000 мин$^{-1}$					
Предел прочности на сжатие, МПа	3 900	3 910	2 800	4 700	4 900	3 000
Твердость, HRA	91,5	88,0	86,0	91,5	90,5	88,5
Модуль упругости, ГПа	645	598	559	638	632	549
Цена одного режущего элемента, руб.	63	66	54	95	95	45

Таблица 2
Table 2

Результаты расчета критериев производства
Production criteria calculation results

Параметры	Значение параметра					
Код конструкции	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6
Период стойкости T, мин	61,26	39,29	22,65	76	71,67	34,05
Производительность P, 10^{-5} м^3/мин	16,15	10,36	5,97	20,04	18,9	8,89
Приведенные затраты, PZ, 10^{-3} руб/мм^3	6,26	9,76	16,93	5,098	5,41	12,74
Высота микронеровностей, R_z мкм	23					

работоспособность и производительность будут иметь безразмерное численное значение, равное модулю величины критерия $a_{ij} = \left|P_{ij}\right|$, а производственные затраты – безразмерное численное значение, равное модулю обратной величины критерия: $a_{ij} = \left|\frac{1}{P_{ij}}\right|$. После проведения ранжирования критериев строим матрицу смежности

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & T & P & R_z & PZ \\ Q_1 & 61,26 & 16,15\cdot10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{6,26} \\ Q_2 & 39,29 & 10,36\cdot10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{9,76} \\ Q_3 & 22,65 & 5,97\cdot10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{16,93} \\ Q_4 & 76 & 20,04\cdot10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{5,098} \\ Q_5 & 71,67 & 18,9\cdot10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{5,41} \\ Q_6 & 34,05 & 8,98\cdot10^{-5} & \frac{1}{23} & \frac{1}{12,74} \end{pmatrix}.$$

Получим значения:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & T & P & R_z & PZ \\ Q_1 & 61,26 & 16,15\cdot10^{-5} & 0,043 & 0,16 \\ Q_2 & 39,29 & 10,36\cdot10^{-5} & 0,043 & 0,10 \\ Q_3 & 22,65 & 5,97\cdot10^{-5} & 0,043 & 0,06 \\ Q_4 & 76 & 20,04\cdot10^{-5} & 0,043 & 0,20 \\ Q_5 & 71,67 & 18,9\cdot10^{-5} & 0,043 & 0,18 \\ Q_6 & 34,05 & 8,98\cdot10^{-5} & 0,043 & 0,08 \end{pmatrix}.$$

Так как значение шероховатости должно быть одинаковым для каждого объекта, то его значением можно пренебречь. Для вычисления весового критериального коэффициента q_i для каждого i-го объекта сравнения в отдельности производим вычисления выбранного критерия по формуле (2):

$$q_1 = 61{,}26 + 16{,}15\cdot10^{-5} + 0{,}16 = 77{,}57\cdot10^{-5},$$

$$q_2 = 39{,}29 + 10{,}36\cdot10^{-5} + 0{,}10 = 49{,}75\cdot10^{-5},$$

$$q_3 = 22{,}65 + 5{,}97\cdot10^{-5} + 0{,}06 = 28{,}68\cdot10^{-5},$$

$$q_4 = 76 + 20{,}04\cdot10^{-5} + 0{,}20 = 96{,}22\cdot10^{-5},$$

$$q_5 = 71{,}67 + 18{,}9\cdot10^{-5} + 0{,}18 = 90{,}75\cdot10^{-5},$$

$$q_6 = 34{,}05 + 8{,}98\cdot10^{-5} + 0{,}08 = 43{,}1\cdot10^{-5}.$$

Полученные в результате расчета значения весового критериального коэффициента формируем в результирующий вектор для анализируемых конструкций режущего инструмента:

$$q = \begin{vmatrix} 77,57\cdot10^{-5} \\ 49,75\cdot10^{-5} \\ 28,68\cdot10^{-5} \\ 96,22\cdot10^{-5} \\ 90,75\cdot10^{-5} \\ 43,10\cdot10^{-5} \end{vmatrix}.$$

Таким образом, по результатам сравнительного мультикритериального анализа следует вывод о приоритете в рассматриваемой системе с оговоренными параметрами реализации технологии конструкции O_4, оснащенной сплавом ВК3М, у которой наблюдается наибольшее значение коэффициента q. При составлении матрицы смежности уже наблюдалось превосходство этой конструкции над аналогичными конструкциями режущих инструментов по выбранным критериям. Это говорит еще и о наглядности выбранной методики. По результатам анализа близким по рациональности является инструмент, оснащенный сплавом марки ВК6ОМ, что позволяет рекомендовать его в качестве аналога при выборе.

Представленный пример рациональности фрезерования композиционных материалов ограничен только выбором материалов режущей части инструмента. В реальных же условиях производства технологический процесс содержит большее количество параметров и критериев, которые необходимо ранжировать исходя из условий производства.

Выводы

Данная методика обеспечит возможность создания производственных объектов или систем на базе существующих путем проведения различных мероприятий, использующих временные организационные связи без трудоемких материальных перестроек. Это новый подход к процессу формирования производственной системы с требуемыми свойствами. Процесс выработки проектного решения состоит из последовательных действий по выдвижению взаимоисключающих альтернатив, их оценки и соответственно выбора. Задача по выбору оптимального варианта решается за счет использования общих знаний проблемной среды и внутрен-

ней модели любой системы и осуществления направленного поиска с исключением из рассмотрения заведомо неприемлемых решений.

1. Область предполагаемого применения методики видится при необходимости анализа сложных мультивариантных систем/объектов.

2. В качестве объектов/систем могут быть как варианты научных решений при различных условиях сопоставимости, так и конструкторские, технологические решения, конструкционные и инструментальные материалы на стадии выбора при конструкторской и технологической подготовке производства, варианты алгоритма реализации систем.

3. Параметрами сравнения могут быть физико-механические, технологические, эксплуатационные свойства, технико-экономические и качественные показатели, специфические характеристики и параметры.

4. Предложенная методика позволит сократить время на принятие новых решений при варьируемых условиях производства и определять корреляцию этапов проектирования.

Использование методики при известных и четко определенных параметрах, характеризующих мультивариантные системы, позволяет алгоритмизировать, а в последующем и автоматизировать процесс организационно-технологической подготовки производства. Это значительно сократит время и повысит качество процесса многокритериального сравнительного анализа систем и принятия обоснованных решений (научных или производственных) при варьируемых условиях сопоставимости.

Список литературы

1. Обеспечение качества при абразивной обработке: вопросы теории и практики / Т.А. Аскалонова, А.М. Иконников, С.Л. Леонов, Ю.К. Новоселов, А.А. Ситников, Е.Ю. Татаркин; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2016. – 219 с. – ISBN 978-5-7568-1170-4.

2. *Песин М.В., Макаров В.Ф., Мокроносов Е.Д.* Методы проектирования и оптимизации технологического процесса упрочнения деталей нефтегазового назначения // Экспозиция Нефть Газ. – 2011. – № 6 (18). – С. 18–19.

3. *Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф.* Методика оценки колебаний системы при торцовом фрезеровании портативным оборудованием // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 7 (208). – С. 46–49. – DOI: 10.14489/hb.2014.07.pp.046-049.

4. *Борисов М.А., Лимонов С.Е.* Анализ и совершенствование роботизированного оборудования для исследований в области автоматизации производственных процессов // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 19–22 апреля 2022 г. – Севастополь, 2022. – С. 112–115.

5. *Кудряшов Е.А., Никонов А.М.* Обработка деталей из разнородных конструкционных материалов инструментом из композитов // СТИН. – 2008. – № 12. – С. 26–28.

6. *Татаркин Е.Ю., Иконников А.М., Шрайнер Т.А.* Автоматизация выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов. – Кемерово, 2015. – С. 196–201.

7. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования / В.А. Носенко, Н.Ф. Ларионов, Н.И. Егоров, М.П. Волков // Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 17–21.

8. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3 (24). – С. 187–192.

9. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity / O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov, N.M. Bobrovskij, I.N. Bobrovskij, P.A. Melnikov // 13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): Proceedings: in 12 volumes, Novosibirsk, 2016. – P. 241–244. – DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802265.

10. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Совмещение операций поверхностной закалки и финишного шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 1 (30). – С. 16–18.

11. *Татаркин Е.Ю., Иконников А.М.* Функционально-стоимостный анализ технологических процессов изготовления деталей // Инновации в машиностроении: труды 4-й Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 02–04 октября 2013 г. – Новосибирск, 2013. – С. 386–387.

12. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов, Е.А. Сукочева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 6 (675). – С. 73–81.

13. *Скиба В.Ю.* Обеспечение требуемого характера распределения остаточных напряжений при упрочнении высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2007. – № 2 (35). – С. 25–27.

14. *Малюченков А.В., Кожевников А.В.* Организация подготовки производства новых изделий как основа инновационного развития предприятия // Инновационный вестник Регион. – 2009. – № 1. – С. 14–21.

15. *Амелин С.В.* Организация производства в машиностроении в условиях цифровой трансформации // Организатор производства. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 17–23.

16. Сравнительный многокритериальный анализ сложных технических и социальных систем в экономико-управленческом аспекте / Д.В. Панов, В.В. Малышев, С.А. Пиявский, Д.В. Ковков // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2016. – Т. 7, № 2 (26). – С. 74–83. – DOI: 10.18184/2079-4665.2016.7.2.74.83.

17. Интегральная обработка как эффективное направление решения задачи перехода к ресурсосберегающим технологиям / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцивский, Н.П. Зуб, С.В. Туревич // Инновационная деятельность. – 2010. – № 1 (10). – С. 66–69.

18. Методика комплексного оценивания технического состояния сложных технических систем, реализуемая на основе применения теории линейных преобразований матриц / Р. Катюха, С. Багрецов, А. Бабишкин, В. Королев // Компоненты и технологии. – 2016. – № 9 (182). – С. 122–123.

19. *Родионова В.Н., Луценко М.С.* Организационные основы обеспечения гибкости производства в условиях развития инновационной деятельности // Организатор производства. – 2012. – № 4 (55). – С. 17–22.

20. *Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V.* Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions // Metals. – 2021. –Vol. 11, iss. 9. – P. 1354. – DOI: 10.3390/met11091354.

21. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremenkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeeba, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, iss. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.

22. *Зареченский А.М.* Организация производства на высокотехнологичных предприятиях в условиях цифровой экономики // СТИН. – 2021. – № 11. – С. 10–12.

23. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, А.А. Харченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 35–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.

24. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства на основе синхронного подхода / В.Ф. Макаров, В.Р. Туктамышев, С.В. Масленков, Я.А. Катаев, И.И. Койнов, О.И. Трепезаева // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 9 (39). – С. 35–39.

25. *Кисель А.Г., Реченко Д.С.* Оценка технологической эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при лезвийной обработке // Механики XXI веку. – 2013. – № 12. – С. 160–161.

26. *Рощупкин С.И., Колесов А.Г., Тараховский А.Ю.* Анализ технологии и оборудования для изготовления металлополимерных филаментов для 3D-печати по технологии Fused deposition modeling (FDM) // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2021. – № 7. – С. 25–27. – DOI: 10.26160/2541-8637-2021-7-25-27.

27. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2012. – 296 с. – ISBN 978-5-94178-347-2.

28. *Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В.* Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 22. – С. 14–22.

29. *Рычков Д.А., Янюшкин А.С.* Технология механической обработки композиционных материалов. – Братск: Изд-во Брат. гос. ун-та, 2017. – 224 с.

30. *Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В.* Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 30–41.

31. *Лобанов Д.В., Владимирова Н.А., Рафанова О.С.* Особенности процесса лезвийной обработки полимерных композиционных материалов и формообразования режущего инструмента // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 14–15 декабря 2020 г. – Пермь, 2021. – С. 141–144.

32. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов / В.Ф. Макаров, И.И. Койнов, Р.С. Абзаев, В.В. Ши-

ринкин, А.Е. Мешкас // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 12 (66). – С. 20–27.

33. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А.* Оптимизация выбора режущего инструмента на основе методов сравнительного анализа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5-2 (283). – С. 23–30.

34. *Лобанов Д., Янюшкин А., Рычков Д.* Автоматизированная система создания баз данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // САПР и графика. – 2011. – № 3 (173). – С. 71–73.

35. *Лобанов Д.В., Рафанова О.С., Владимирова Н.А.* Оценка экономичности лезвийной обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8, № 3–4. – С. 30–35.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 85–97
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Methodology for criteria analysis of multivariant system

Dmitry Lobanov [a, *], ***Olesya Rafanova*** [b]

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-0560-4730, olesya-karamaeva89@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 December 2022
Revised: 14 January 2023
Accepted: 25 January 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Analysis
Comparison
Multivariate systems
Production efficiency
Production organization
Automation
Quality

Acknowledgements
Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Trends in the development and application of modern machine-building systems somehow create the problem of analysis and choice in the presence of alternative objects, or with a large number of comparison criteria - indicators of the effectiveness of objects or systems. The main difficulties in optimizing the solution for designing production systems depend on complex technological problems: a large number of influencing factors and the absence of patterns. The choice of effective objects and systems is often a complex and multi-criteria process that requires a lot of time and, as a result, reduces the efficiency of the organization of production preparation. In this regard, for the preparation and adoption of technical and economic decisions of various complexity in production conditions, a systematic approach is required using the most rational forms and methods of organizing production. **The purpose of the work:** to create a generalized methodology for the criteria analysis of multivariant systems. **The methods of investigation.** A methodology is proposed aimed at improving the efficiency of the organization of pre-production due to a reasonable choice from a large number of options. The choice of a rational solution option is based on the ranking of indicators by priority at the time of making a reasonable decision in a specific situation and the type of object and system under consideration. Indicators can be variable, taking into account the specifics of production. **Results and Discussion**. A comparative analysis of the process of edge cutting machining of the *STEF-1* fiber-glass polymer composite material with an interlocking side mill carrying various insert materials is conducted as an example of the practical application of the proposed methodology. As comparison parameters, the period of technological tool life, cutting performance and reduced costs in the implementation of cutting are taken. According to the results of a comparative multi-criteria analysis carried out according to the presented method, it follows that the priority in the system under consideration with the specified parameters for the implementation of the technology is the tool equipped with *WC–3Co* alloy inserts, which has the highest value of the weight criteria coefficient. According to the results of the analysis, a tool equipped with *WC–2TaC–6Co* alloy inserts is close in rationality, which allows recommending it as an analogue when choosing. The scope of the proposed application of the methodology is seen if it is necessary to analyze complex multivariant systems/objects. The objects/systems can be both variants of scientific solutions under various conditions of comparability, as well as design, technological solutions, structural and instrumental materials at the selection stage in the design and technological preparation of production, variants of the system implementation algorithm. The comparison parameters can be physical, mechanical, technological, operational properties; technical, economic and quality indicators; specific characteristics and parameters. The proposed technique will reduce the time for making new decisions under varying production conditions. The use of the methodology with known and well-defined parameters characterizing multivariant systems makes it possible to algorithmize, and subsequently automate, the process of organizational and technological preparation of production.

For citation: Lobanov D.V, Rafanova O.S. Methodology for criteria analysis of multivariant system. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 85–97. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97. (In Russian).

References

1. Askalonova T.A., Ikonnikov A.M., Leonov S.L., Novoselov Yu.K., Sitnikov A.A., Tatarkin E.Yu. *Obespechenie kachestva pri abrazivnoi obrabotke: voprosy teorii i praktiki* [Quality assembly for abrasive processing: theories and practice issues]. Barnaul, Polzunov Altai State Technical University Publ., 2016. 219 p. ISBN 978-5-7568-1170-4.

*** Corresponding author**
Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Professor
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky Prospekt,
428015, Cheboksary, Russian Federation
Tel.: + 7-908-303-47-45, **e-mail**: lobanovdv@list.ru

2. Pesin M.V., Makarov V.F., Mokronosov E.D. Metody proektirovaniya i optimizatsii tekhnologicheskogo protsessa uprochneniya detalei neftegazovogo naznacheniya [Design and optimization methods of technological processes hardening of the products of oil-and-gas purpose]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Exposition Oil Gas*, 2011, no. 6 (18), pp. 18–19.

3. Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V., Kuznetsov S.F. Metodika otsenki kolebanii sistemy pri tortsovom frezerovanii portativnym oborudovaniem [Assessment method of mechanical system oscillations for portable equipment face milling process]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering Journal*, 2014, no. 7 (208), pp. 46–49. DOI: 10.14489/hb.2014.07.pp.046-049.

4. Borisov M.A., Limonov S.E. [Analysis and improvement of robotic equipment for research in field of automation of production processes]. *Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy* [Modern technologies: problems and prospects]. A collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference for graduate students, students and young scientists. Sevastopol, 2022, pp. 112–115. (In Russian).

5. Kudryashov E.A., Nikonov A.M. Obrabotka detalei iz raznorodnykh konstruktsionnykh materialov instrumentom iz kompozitov [Processing parts from heterogeneous structural materials with a tool from composites]. *STIN= Russian Engineering Research*, 2008, no. 12, pp. 26–28. (In Russian).

6. Tatarkin E.Yu., Ikonnikov A.M., Schrayner T.A. [Automated selection tool for operations magnetic abrasive machining of complex surfaces]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash-2015)* [Innovation in mechanical engineering (ISPCIME-2015)]. VII International Scientific and Practical Conference. Materials. Kemerovo, 2015, pp. 196–201. (In Russian).

7. Nosenko V.A., Larionov N.F., Egorov N.I., Volkov M.P. Vybor kharakteristiki abrazivnogo instrumenta i SOZh dlya glubinnogo shlifovaniya [The choice of the characterization of abrasive tools and coolant for deep grinding]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1989, no. 5, pp. 17–21. (In Russian).

8. Ivancivsky V.V., Skeeba V.Yu. Povyshenie poverkhnostnoi mikrotverdosti stali pri integratsii poverkhnostno-termicheskoi i finishnoi mekhanicheskoi obrabotok [Increased surface microhardness of steel in the integration of surface-thermal and mechanical finishing treatments]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (24), pp. 187–192.

9. Zakharov O.V., Kochetkov A.V., Bobrovskij N.M., Bobrovskij I.N., Melnikov P.A. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity. *13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016)*: Proceedings: in 12 vols, Novosibirsk, 2016, pp. 241–244. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802265.

10. Ivantsivsky V.V., Skeeba V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskom oborudovanii [Combining the operations of surface hardening and finish grinding on the same processing equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2006, no. 1 (30), pp. 16–18.

11. Tatarkin E.Yu., Ikonnikov A.M. [Functional analysis of the technological processes of manufacturing parts]. *Innovatsii v mashinostroenii* [Works of the 4th International Scientific and Practical Conference "Innovation in mechanical engineering"]. Novosibirsk, 2013, pp. 386–387. (In Russian).

12. Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Sarazov A.V., Sukocheva E.A. Vybor optimal'nykh uslovii ploskogo shlifovaniya stal'nykh zagotovok [The determination of optimal conditions for flat grinding of steel workpieces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 6 (675), pp. 73–81.

13. Skeeba V.Yu. Obespechenie trebuemogo kharaktera raspredeleniya ostatochnykh napryazhenii pri uprochnenii vysokoenergeticheskim nagrevom tokami vysokoi chastoty [Providing the required character of the residual stress distribution for hardening high-energy high-frequency heating]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2007, no. 2 (35), pp. 25–27.

14. Malyuchenkov A.V., Kozhevnikov A.V. Organizatsiya podgotovki proizvodstva novykh izdelii kak osnova innovatsionnogo razvitiya predpriyatiya [Organization of preparation for the production of new products as a basis for innovative development of the enterprise]. *Innovatsionnyi vestnik Region = Innovative bulletin Region*, 2009, no. 1, pp. 14–21.

15. Amelin S.V. Organizatsiya proizvodstva v mashinostroenii v usloviyakh tsifrovoi transformatsii [Organization of production in mechanical engineering in conditions of digital transformation]. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 17–23.

16. Panov D.V., Malyshev V.V., Piyavskii S.A., Kovkov D.V. Sravnitel'nyi mnogokriterial'nyi analiz slozhnykh tekhnicheskikh i sotsial'nykh sistem v ekonomiko-upravlencheskom aspekte [Comparative multiobjective analysis of

complicated technical and social systems in terms of economics and management]. *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie) = MIR (Modernization. Innovation. Research)*, 2016, vol. 7, no. 2 (26), pp. 74–83. DOI: 10.18184/2079-4665.2016.7.2.74.83.

17. Skeeba V.Yu., Ivancivskiy V.V., Zub N.P., Turevich S.V. Integral'naya obrabotka kak effektivnoe napravlenie resheniya zadachi perekhoda k resursosberegayushchim tekhnologiyam [Integrated processing as an effective direction of the decision problems of transition to alternative technologies]. *Innovatsionnaya deyatel'nost' = Innovation Activity*, 2010, no. 1 (10), pp. 66–69.

18. Katyukha R., Bagretsov S., Babishkin A., Korolev V. Metodika kompleksnogo otsenivaniya tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem, realizuemaya na osnove primeneniya teorii lineinykh preobrazovanii matrits [The method of comprehensive evaluation of the technical condition of complex technical systems, implemented on the basis of application of the theory of linear matrix transformations]. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2016, no. 9 (182), pp. 122–123.

19. Rodionova V.N., Lutsenko M.S. Organizatsionnye osnovy obespecheniya gibkosti proizvodstva v usloviyakh razvitiya innovatsionnoi deyatel'nosti [Organizational basis for flexibility of production in the development of innovation]. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*, 2012, no. 4 (55), pp. 17–22.

20. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.

21. Efremenkov E.A., Martyushev N.V., Skeeba V.Yu., Grechneva M.V., Olisov A.V., Ens A.D. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, iss. 5. DOI: 10.3390/app12010005.

22. Zarechenskii A.M. Organizatsiya proizvodstva na vysokotekhnologichnykh predpriyatiyakh v usloviyakh tsifrovoi ekonomiki [Organization of production at high-tech enterprises in the conditions of digital economy]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2021, no. 11, pp. 10–12. (In Russian).

23. Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.A. Analiz i sintez sistemy vibroizolyatsii shlifoval'nogo stanka s uchetom ekspluatatsionnoi nadezhnosti ee elementov [Analysis and synthesis of vibration isolation system of a grinding machine with account of the operational reliability of its elements]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 35–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.

24. Makarov V.F., Tuktamyshev V.R., Maslenkov S.V., Kataev Ya.A., Koynov I.I., Trepezaeva O.I. Avtomatizatsiya konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na osnove sinkhronnogo podkhoda [Automation of design-engineering preparation of production on the base of synchronous approach]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii= Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 9 (39), pp. 35–39.

25. Kisel' A.G., Rechenko D.S. Otsenka tekhnologicheskoi effektivnosti smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostei pri lezviinoi obrabotke [Evaluation of the technological efficiency of lubricant-cooling liquids for blading]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanical engineers to XXI century*, 2013, no. 12, pp. 160–161.

26. Roshchupkin S.I., Kolesov A.G., Tarakhovskiy A.Yu. Analiz tekhnologii i oborudovaniya dlya izgotovleniya metallopolimernykh filamentov dlya 3D-pechati po tekhnologii Fused deposition modeling (FDM) [Analysis of technology and equipment for the production of metal-polymer filaments for 3d printing using fused deposition modeling (FDM) technology]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika = Mechatronics, Automation and Robotics*, 2021, no. 7, pp. 25–27. DOI: 10.26160/2541-8637-2021-7-25-27.

27. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya instrumental'nogo obespecheniya proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh nemetallicheskikh materialov* [Tooling technology for the production of products from composite non-metallic materials]. Stary Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2012. 296 p.

28. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Issledovanie protsessov mekhanicheskoi obrabotki detalei aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki iz novykh kompozitsionnykh materialov [Research of processes of machining of details of aerospace technics from new composite materials]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii = New Materials and Technologies in Engineering*, 2015, no. 22, pp. 14–22.

29. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya mekhanicheskoi obrabotki kompozitsionnykh materialov* [Technology of mechanical processing of composite materials]. Bratsk, Bratsk State University Publ., 2017. 224 p.

30. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Issledovanie problem mekhanicheskoi obrabotki sovremennykh vysokoprochnykh kompozitsionnykh materialov, ispol'zuemykh dlya proizvodstva detalei aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki [Research problems machining high strength composite materials used for the production of details of aviation and space-rocket technicians]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*

politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 2015, no. 2, pp. 30–41.

31. Lobanov D.V., Vladimirova N.A., Rafanova O.S. [Features of the process blade processing polymeric composite materials and formation of the cutting tool]. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti* [Electrophysical Machining in Modern Industry: Proceedings of International scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students], Perm, 2021, pp. 141–144. (In Russian).

32. Makarov V.F., Koinov I.I., Absaiev R.S., Shirinkin V.V., Meshkas A.E. Osobennosti diagnostiki protsessa rezaniya pri sverlenii kompozitsionnykh materialov [Peculiarities in diagnostics of cutting process at composite material drilling]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 12 (66), pp. 20–27.

33. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. Optimizatsiya vybora rezhushchego instrumenta na osnove metodov sravnitel'nogo analiza [Optimization of the choice of the cutting tool on the basis of methods of the comparative analysis]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2010, no. 5-2 (283), pp. 23–30.

34. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. Avtomatizirovannaya sistema sozdaniya baz dannykh i mnogokriterial'nogo sravnitel'nogo analiza konstruktsii sbornogo frezernogo instrumenta dlya obrabotki kompozitsionnykh materialov [Automated system for creating databases and multi-criteria comparative analysis of assembly milling tool structures for processing composite materials]. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*, 2011, no. 3 (173), pp. 71–73.

35. Lobanov D.V., Rafanova O.S., Vladimirova N.A. Otsenka ekonomichnosti lezviinoi obrabotki kompozitsionnykh materialov [Estimation of the economy of composite materials blade processing]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii= Actual Problems in Machine Building*, 2021, no. 3–4, pp. 30–35.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 98–109
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-98-109

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Особенности формирования диффузионных покрытий, полученных комплексной химико-термической обработкой конструкционных сталей

Александр Соколов [a], *Эдуард Бобылёв* [b, *], *Роман Попов* [c]

Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-8105-1429, sag51@bk.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-7754-1807, ebobylev@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0003-4875-5018, popov-romanya@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.5

История статьи:
Поступила: 03 октября 2022
Рецензирование: 03 ноября 2022
Принята к печати: 19 декабря 2022
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Диффузия
Покрытие
Хром
Химико-термическая обработка
Сталь

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены основные способы увеличения работоспособности изделий, изготовленных из конструкционных сталей. Приведено описание технологий диффузионного легирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов (ДЛЛЖР) и разработанной технологии комплексного диффузионного легирования поверхностных слоев материала изделий (КХТО), включающей технологии ДЛЛЖР и цементацию. **Целью работы** являлось определение влияния состава сталей на процесс формирования и элементный состав диффузионно-легированных поверхностных слоев (покрытий) на базе хрома, а также установление отличий и закономерностей в процессах формирования диффузионно-легированных покрытий после проведения ДЛЛЖР и КХТО. **Методика исследований.** ДЛЛЖР подвергались цилиндрические образцы диаметром 20 мм, длиной 30 мм. Образцы были изготовлены из углеродистых и легированных сталей: малоуглеродистых Ст3, 20Х13, среднеуглеродистых 40Х, 40Х13 и аустенитной слали 12Х18Н10Т. При этом часть образцов предварительно подверглась вакуумной цементации. В качестве технологической среды при ДЛЛЖР (транспортный расплав) использовался эвтектический расплав свинец-висмут, в который в заданном количестве вводился хром. Металлографические исследования проводились на микрошлифах, подготовленных по стандартной методике, исследования по определению толщины покрытий, их структуры – на микротвердомере Dura Scan Falcon 500. Определение элементного состава покрытий осуществлялось методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 с системой РСМА Oxford Ultim MAX. **Результаты и обсуждение.** В результате исследований было выявлено, что при ДЛЛЖР и КХТО происходит формирование диффузионных покрытий. При этом толщина покрытий и их элементный состав зависят от марки стали и применяемой технологии. После ДЛЛЖР процентное содержание хрома варьируется от 96,9 до 91,1 %. При этом максимальная концентрация 96,9 % наблюдается на стали Ст3. После КХТО на поверхностях всех сталей концентрация Cr снижается по сравнению с покрытиями, полученными по технологии ДЛЛЖР, на сталях: Ст3 с 96,9 до 66,8%; 40Х с 91,1 до 63,18 %; 20Х13 с 93,18 до_62,54 %; Сталь 12Х18Н10Т – с 92,92 до 64,77 %. Общая толщина диффузионно-легированных покрытий, сформированных на всех исследуемых нами сплавах, лежит в пределах от 17 до 17,5 мкм.

Для цитирования: *Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э., Попов Р.А.* Особенности формирования диффузионных покрытий, полученных комплексной химико-термической обработкой конструкционных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 98–109. – DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.1-98-109.

Введение

Одной из весьма значительных причин потери работоспособности деталей машин является их коррозионно-механический износ. В данном случае основному разрушающему воздействию подвергаются поверхностные слои деталей. В связи с этим применение упрочняющих технологий является одним из наиболее распространенных способов повышения эксплуатационных свойств деталей [1–4].

При применении технологий упрочнения поверхностных слоев деталей на поверхности материала создаются функциональные слои (покрытия) на основе таких металлов, как например Cr, Ti, W, Al, Mo, Ni, и/или их химических соединений с углеродом или азотом [5–8]. Подобные покрытия имеют кристаллическую структуру и позволяют варьировать в широком

***Адрес для переписки**
Бобылёв Эдуард Эдуардович, к.т.н., доцент
Кубанский государственный технологический университет,
ул. Московская, 2,
350072, г. Краснодар, Россия
Тел: +7-918-975-8933; **e-mail:** ebobylev@mail.ru

диапазоне такими свойствами поверхностных слоев конструкционных сталей, как твердость, коррозионная стойкость, износостойкость и т. д. При этом стоит отдельно выделить покрытия на основе хрома. Хром является достаточно распространенным металлом, имеют высокую коррозионную стойкость, его карбиды и нитриды обладают высокой микротвердостью [9–12]. Кроме того, важно отметить, что хром образует с железом непрерывный ряд твердых растворов и широко используется как легирующий элемент. В связи с этим покрытия на основе хрома являются достаточно распространенным выбором для повышения стойкости деталей машин к коррозионно-механическому износу.

Для нанесения подобных покрытий применяются такие способы упрочнения, как наплавка, газопламенное напыление, гальванические покрытия, химико-термическая обработка и др. [13–15]. При этом наиболее простыми с технологической точки зрения, промышленно реализуемыми и масштабируемыми, экономически выгодными являются технологии химико-термической обработки.

Известен способ термодиффузионного хромирования, когда на поверхность детали наносится обмазка, содержащая в своем составе хром. В дальнейшем деталь подвергается выдержке при температурах от 1000 до 1100 °С и последующей отчистке. К недостаткам данного способа можно отнести большую степень загрязнения остатками насыщающей смеси поверхности детали и неравномерность покрытий [16].

Известен также способ диффузионного насыщения конструкционных сталей хромом из расплавов солей. Общим недостатком такого типа покрытий является низкая адгезия покрытия (по сравнению с диффузионными покрытиями) и основного материала, особенно, если существует необходимость формирования покрытия на основе карбидов или нитридов [17].

Одним из перспективных методов получения покрытий на основе хрома является диффузионное легирование из среды легкоплавких жидкометаллических растворов (ДЛЛЖР) [18–19]. Технология предполагает насыщение детали в среде легкоплавких металлов, в которых в определенной пропорции растворены диффундирующие элементы. Формирование покрытий происходит вследствие изотермического селективного массопереноса элементов-диффузантов к поверхности и последующего диффузионного и/или химического взаимодействия с компонентами покрываемого материала. Для получения необходимого сочетания прочности, твердости, износостойкости, коррозионной стойкости перспективной также является разработанная нами технология комплексного диффузионного легирования поверхностных слоев материала изделий (КХТО), включающая в себя технологии ДЛЛЖР, цементацию [20].

Цель статьи – показать влияние состава сталей на процесс формирования и элементный состав диффузионно-легированных поверхностных слоев (покрытий) на базе хрома, а также установление отличий и закономерностей в процессах формирования диффузионно-легированных покрытий после проведения ДЛЛЖР и КХТО.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели проводились экспериментальные исследования, включающие в себя совмещение диффузионного легирования по технологии ДЛЛЖР с технологиями ХТО, в данном случае цементации. Диффузионному легированию, обеспечивающему формирование диффузионно-легированных покрытий, подвергались цилиндрические образцы диаметром 20 мм и длиной 30 мм. Образцы были изготовлены из углеродистых и легированных сталей: малоуглеродистых Ст3, 20Х13, среднеуглеродистых 40Х, 40Х13 и аустенитной слали 12Х18Н10Т. При этом часть образцов предварительно подверглась вакуумной цементации.

Покрытия наносились путем их диффузионного легирования с применением разработанной нами технологии ДЛЛЖР, которая осуществляется путем погружения образцов в ванну с легкоплавким жидкометаллическим раствором, содержащим в растворенном состоянии легирующие элементы, в данном случае хром, на базе которых формируются покрытия, и выдержки в изотермическом режиме. Процесс проводился в инертной среде (аргоне).

Технология ДЛЛЖР основана на явлении изотермического селективного переноса элементов покрытия, растворенных в легкоплавком

расплаве, на поверхность изделия с последующим их диффузионным взаимодействием с основным материалом изделия.

Легирование хромом по технологии ДЛЛЖР проводилось при температуре 1025 °С, длительность выдержки составляла 5 часов.

В качестве технологической среды (транспортный расплав) использовался эвтектический расплав свинец–висмут, в который в заданном количестве вводился хром. Процесс нанесения покрытия проводился в разработанной, запатентованной и изготовленной нами установке для ДЛЛЖР. Данная установка позволяет наносить покрытия в открытой ванне с легкоплавким жидкометаллическим раствором в циклическом режиме и совмещать процесс диффузионной металлизации с термической обработкой материала покрываемого изделия.

Для формирования покрытий по технологии КХТО, технологические этапы которого включают перед нанесением диффузионно-легированных покрытий по технологии ДЛЛЖР, – проведение цементации. В соответствии с этим образцы подвергали предварительной вакуумной цементации при температуре 950 °С в течение 8 часов.

Для анализа полученных сведений о влиянии элементного состава обрабатываемых сталей на процесс формирования диффузионно-легированных покрытий проводились:

1) металлографические исследования на микрошлифах, подготовленных по стандартной методике. Исследования по определению толщины покрытий, их структуры проводились на микротвердомере Dura Scan Falcon 500;

2) определение элементного состава покрытий проводилось методом микрорентгеноспектрального анализа с распылением поверхности (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 с системой РСМА Oxford Ultim MAX.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенных исследований было выявлено, что покрытия, формирующиеся в процессе ДЛЛЖР, значительно отличаются от покрытий, получаемых путем проведения КХТО, включающей предварительную цементацию, т. е. цементацию перед ДЛЛЖР. Так, проведение КХТО приводит к формированию диффузионно-легированных покрытий значительно большей толщины, а также покрытия имеют иной элементный состав и эксплуатационные свойства, в частности, механические и физико-химические.

Кроме того, было выявлено, что при одинаковых режимах хромирования в процессах ДЛЛЖР и КХТО формируются многослойные покрытия, минимум – основной слой и переходные слои, однако структура этих покрытий различна. На рис. 1 представлены микрофотографии поверхностных слоев сталей Ст3, 40Х после проведения ДЛЛЖР и КХТО.

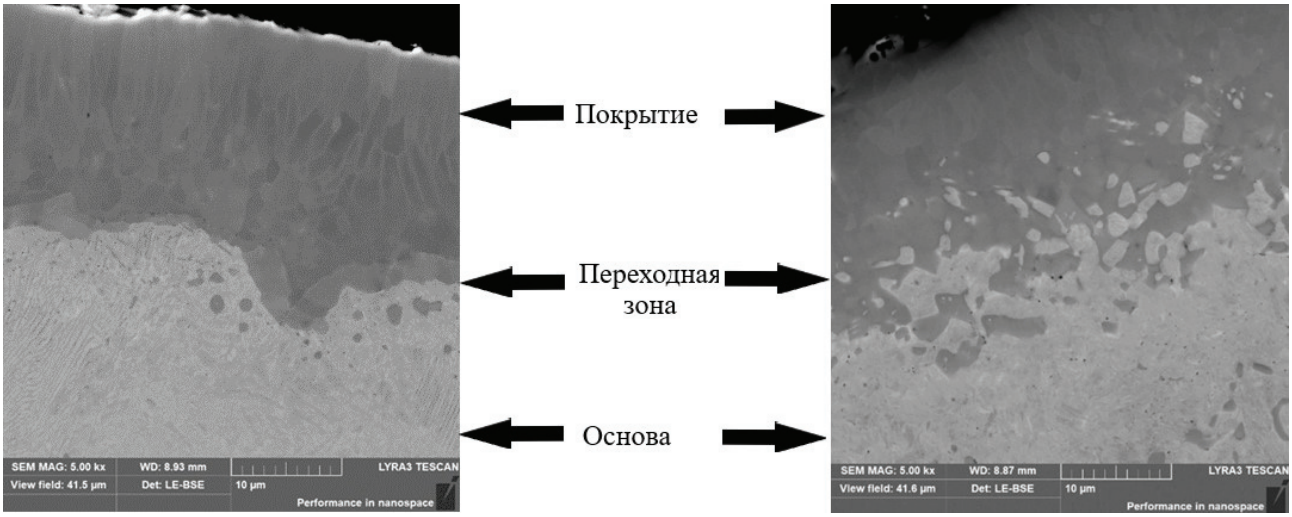
Анализируя данные микрофотографий, можно сделать вывод, что КХТО позволяет получать покрытия большей толщины, чем ДЛЛЖР.

Более точные сведения о толщине и элементном составе слоев, формирующихся в процессе ДЛЛЖР и КХТО, дает микрорентгеноспектральный анализ. Как показали исследования, после проведения диффузионного легирования по технологиям ДЛЛЖР и КХТО при одних и тех же режимах элементный состав и распределение элементов в формирующихся покрытиях во многом отличаются не только толщиной получаемых диффузионных покрытий, но и элементным составом, а следовательно, и свойствами.

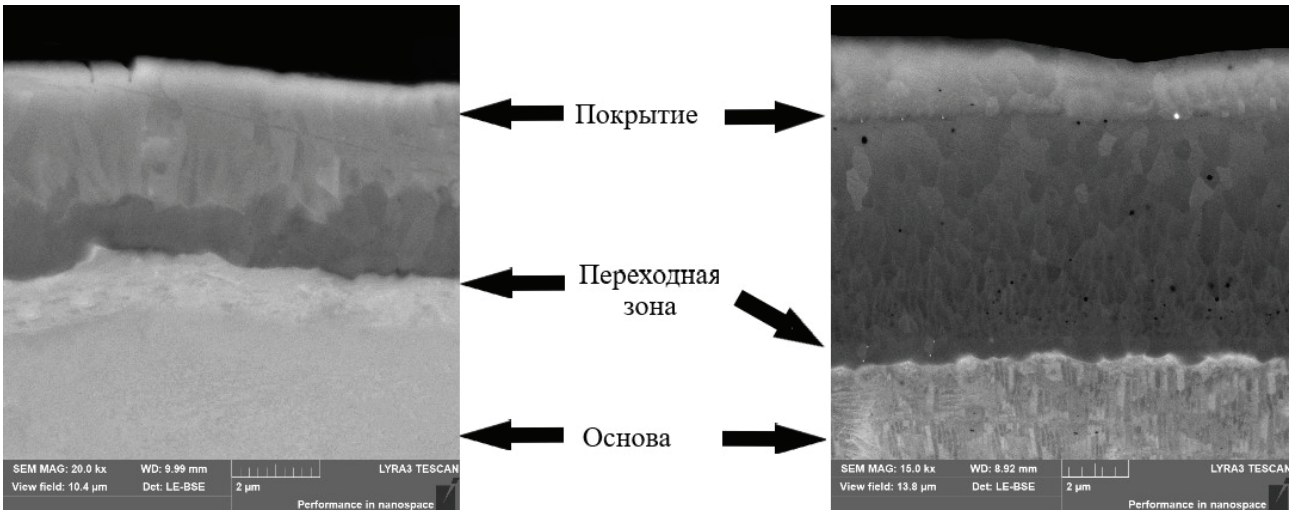
Для выявления особенности формирования диффузионно-легированных хромовых покрытий, получаемых после ДЛЛЖР и КХТО, нами на основании результатов микрорентгеноспектральных исследований был проведен сравнительный анализ элементного состава диффузионно-легированных хромовых покрытий, полученных по технологии ДЛЛЖР и по технологии КХТО, дополнительно включающей в себя предварительную цементацию. При этом сравнивались глубина диффузионного проникновения хрома и его концентрация в различных участках сформированного диффузионно-легированного покрытия. Исследования проводились на малоуглеродистых сталях Ст3 и 20Х13, среднеуглеродистых сталях 40Х и 40Х13 и на аустенитной нержавеющей стали12Х18Н10Т.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа диффузионно-легированных хромовых покрытий, полученных по технологии ДЛЛЖР, представлены на рис. 2.

Как следует из микрорентгеноспектрального анализа, распределения хрома в покрытии, не-



а *б*



б *в*

Рис. 1. Покрытие на поверхности сталей:
а – Ст3 КХТО; *б* – 40Х КХТО; *в* – Ст3 ДЛЛЖР; *г* – 40Х ДЛЛЖР

Fig 1. Coating on the surface of steels:
а – St3 CDS; *б* – 40-Cr CDS; *в* – St3 DSLMMS; *г* – 40-Cr DSLMMS

смотря на различный состав покрываемых сталей, содержание хрома, формирующихся в диффузионно-легированных поверхностных слоях содержится достаточно большое, а для диффузионных покрытий процентное содержание хрома составляет от 96,9 до 91,1 %. При этом максимальная концентрация 96,9 % наблюдается в нелегированной малоуглеродистой стали Ст3. На поверхности остальных покрытий, сформированных на легированных сталях 40Х, 20Х13, 12Х18Н10Т, концентрация хрома снижается практически на 6 %. Такое снижение концентрации хрома в покрытии свидетельствует о влиянии легирующих элементов этих сталей.

Сравнивая глубину диффузионного проникновения хрома и характера его распределения по покрытию, можно отметить, что наименьшая толщина покрытия 8 мкм наблюдается на сталях 20Х13 и 12Х18Н10Т. На сталях 40Х и Ст3 толщина покрытий больше и равна 10…12 мкм.

Исследования по изучению влияния состава покрываемой стали на распределение хрома по покрытию показали, что наблюдается зависимость распределения хрома от состава покрываемой стали, что особенно проявляется на стали 20Х13. На ней выявлено значительно более быстрое падение концентрации хрома в покрытии на участке: поверхность покрытия – матери-

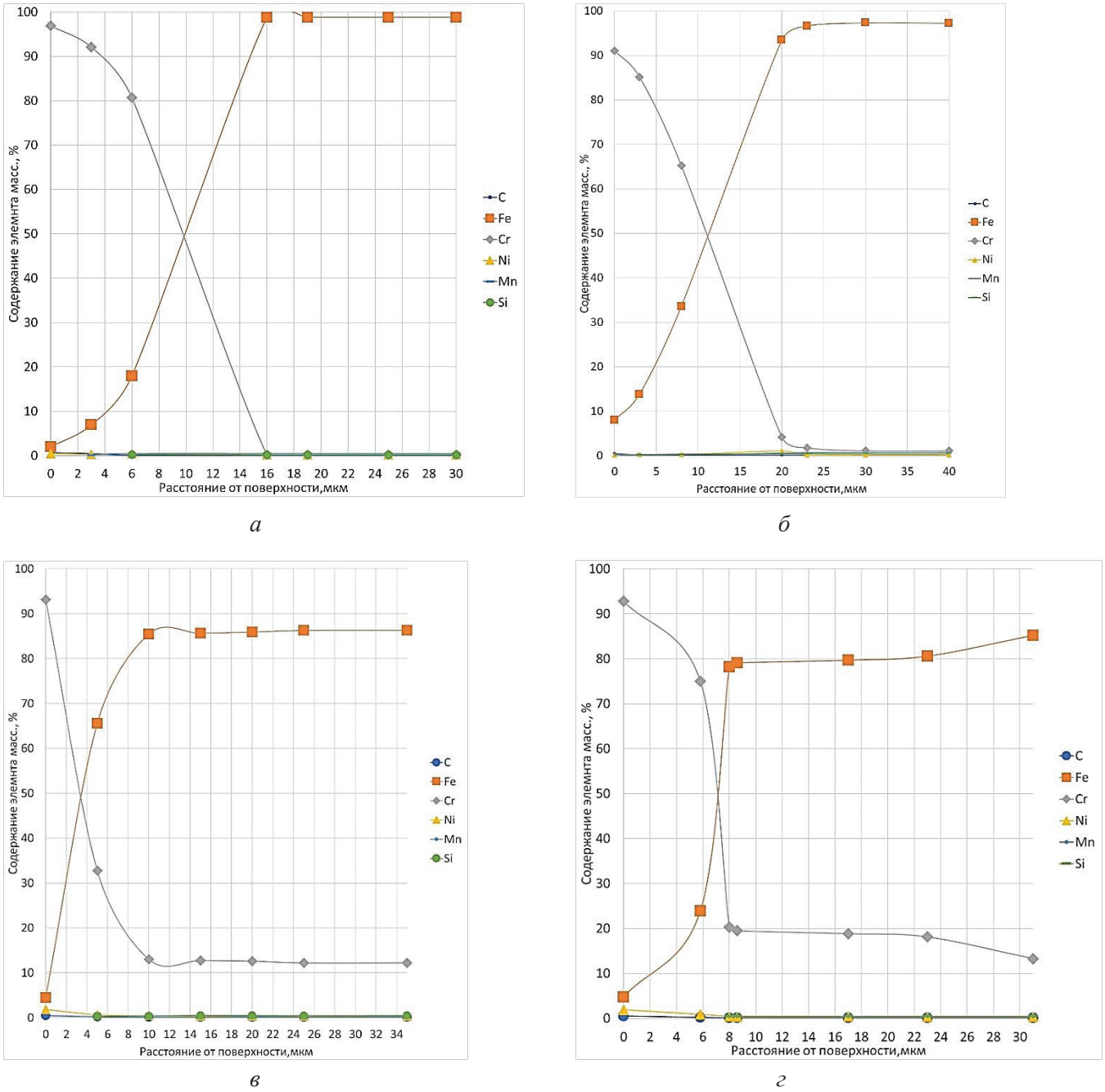


Рис. 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа диффузионно-легированных хромовых покрытий, полученных по технологии ДЛЛЖР, температура 1025 °С, длительность 5 часов:
а – Ст3; *б* – 40Х; *в* – 20Х13; *г* – 12Х18Н10Т

Fig. 2. Results of electron microprobe analysis of diffusion-saturated chromium coatings formed by *DSLMMS*, temperature 1 025 °C, duration 5 h:
а – St3; *б* – 40-Cr; *в* – 20-Cr13; *г* – 12-Cr18-Ni10-Ti

ал основы. Так, концентрация хрома в количестве 60 % в покрытии, сформированном на этой стали, соответствует расстоянию от поверхности, равном 3 мкм, а в сталях 12Х18Н10Т, Ст3, 40Х 60 %-я концентрация хрома наблюдается в покрытиях этих сталях на расстояниях: 6,5; 8; 10 мкм соответственно. Данная особенность в процессе формирования покрытий может быть объяснена наличием в стали 20Х13 достаточно большого количества несвязанного углеродом стали хрома.

Таким образом, элементный состав покрываемых сталей оказывает значительное влияние на формирование покрытий при ДЛЛЖР. Анализируя данные микрорентгеноспектрального анализа, можно сделать вывод, что на формирование

покрытий оказывает влияние содержание таких элементов в покрываемой стали, как углерод и хром. При обработке сталей 20Х13, 12Х18Н10Т, содержащих хром в концентрации более 10 %, наблюдается формирование достаточно тонких покрытий. Это объясняется особенностями взаимодействия диффундирующего хрома и компонентами сталей, уже содержащих хром. Так, для формирования покрытия необходимо образование химических соединений или твердых растворов. Наличие в стали углерода, связанного в карбиды, а также наличие твердых растворов при участии хрома способствует снижению градиента концентрации хрома на границе покрываемый материал – диффузант, и, как следствие, снижение скорости диффузии хрома. В сталях, содержащих хром в малых количествах, наблюдается иной характер формирования покрытий. Углерод, содержащийся в стали в виде твердого раствора в железе или в виде цементита, активно диффундирует к хрому вследствие того, что хром является сильным карбидообразующим элементом по сравнению с железом, стремясь сформировать карбиды хрома. Вероятным механизмом диффузии является диффузия между зернами, что подтверждается данными электронной микроскопии.

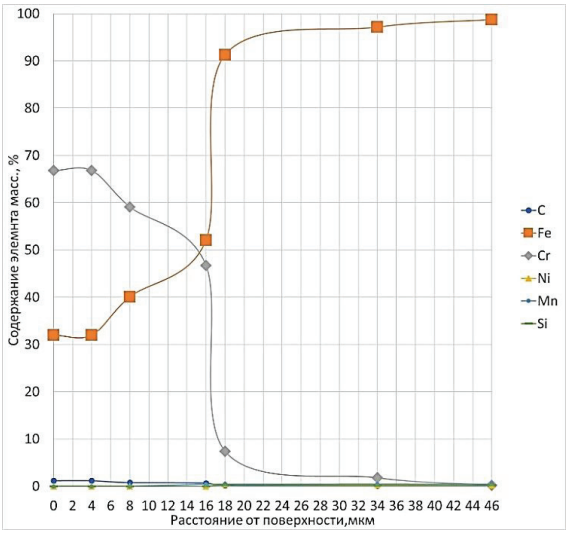
Результаты микрорентгеноспектрального анализа диффузионно-легированных хромовых покрытий, полученных по технологии КХТО, представлены на рис. 3.

Как показали исследования, после проведения КХТО при одних и тех же режимах элементный состав и распределение элементов в формирующихся покрытиях определяются как элементным составом легируемой стали, так и значительным повышением концентрации углерода в поверхностных слоях покрываемых сталей от 2,4 % углерода,полученных на стали 40Х13, до 0,7 % углерода на аустенитной стали 12Х18Н10Т, что подтверждается проведенным микрорентгеноспектральным анализом. Результаты этого анализа представлены на рис. 3.

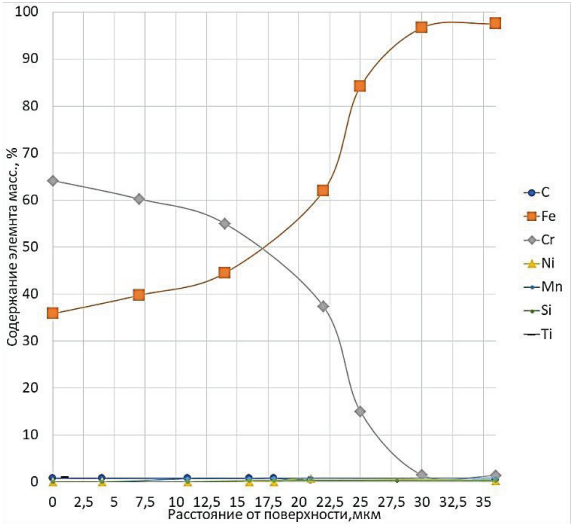
При этом можно отметить, что полученные покрытия состоят из нескольких слоев. На рис. 4 представлено многослойное ЭДС-изображение после КХТО стали 40Х. Анализируя данные микрорентгеноспектрального анализа, можно сделать вывод, что покрытия состоят из нескольких слоев. Поверхностный слой характеризуется высоким содержанием хрома и формируется вследствие диффузии хрома в поверхностные слои покрываемого материала. Между покрытием и основным материалом можно выделить переходную зону, характеризуемую снижением концентрации хрома, увеличением концентрации железа и наличием подслоя с повышенной концентрацией никеля. Формирование с повышенным содержанием никеля можно объяснить тем, что никель, имея низкую взаимную растворимость с карбидами хрома, формирующимися при КХТО, оттесняется в переходную зону.

Как следует из микрорентгеноспектрального анализа распределения хрома в покрытии, несмотря на то, что все исследуемые стали были подвергнуты цементации на одинаковых режимах, распределение хрома определяется количеством углерода в поверхностных слоях покрываемой стали. Так, сравнивая процентное содержание хрома в покрытиях, полученных после проведения КХТО, по сравнению с покрытиями, полученными после ДЛЛЖР, концентрация хрома значительно снижается. Например, при формировании диффузионно-легированных хромовых покрытий, полученных по технологии КХТО, на поверхностях всех сталей наблюдается снижение концентрации хрома по сравнению с покрытиями, полученными по технологии ДЛЛЖР на сталях: Ст3 с 96,9 до 66,8 %;40Х с 91,1 до 63,18 %; 20Х13 с 93,18 до 62,54 %;Сталь 12Х18Н10Т – с 92,92 до 64,77 %. Такое снижение концентрации хрома в поверхностных слоях в диффузионно-легированных хромовых покрытиях, полученных по технологии КХТО, можно объяснить повышенным содержанием углерода в покрытиях, полученных вследствие проведения цементации, связывающего хром в карбидные соединения.

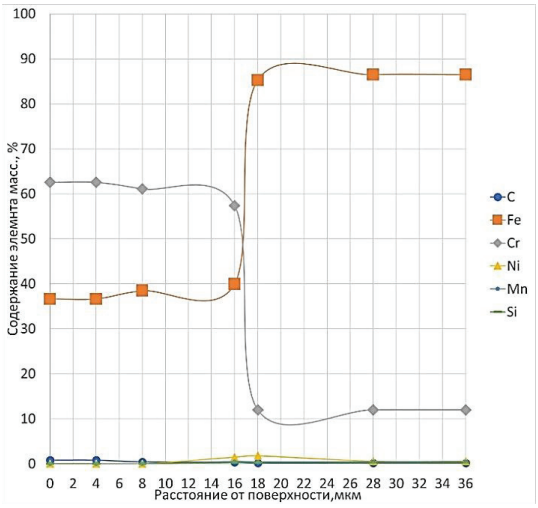
Влияние состава покрываемых сталей на процесс формирования диффузионно-легированных покрытий проявляется вследствие влияния их состава как на процесс цементации, так и на процесс диффузионного легирования. При проведении цементации влияние состава покрываемых сталей на процесс насыщения их поверхностных слоев углеродом происходит по уже достаточно изученному механизму протекания процесса цементации, а влияние цементации на процесс формирования диффузионно-



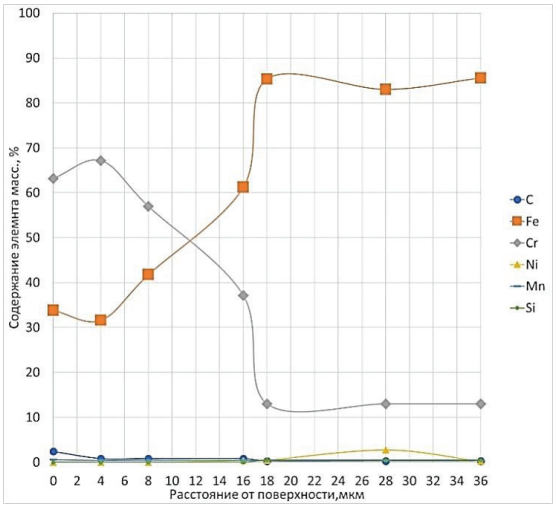
а



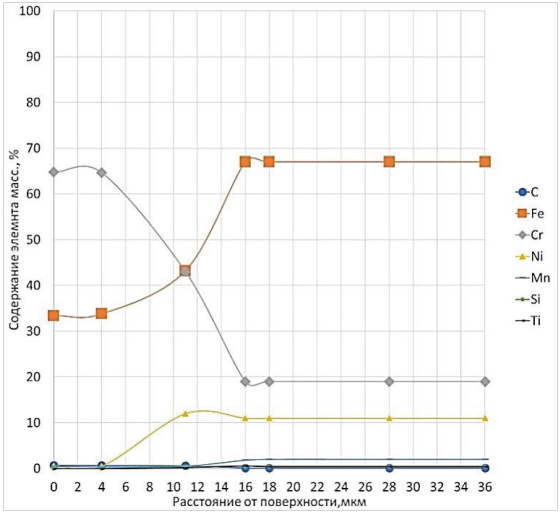
б



в



г



д

Рис. 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа диффузионно-легированных хромовых покрытий, полученных по технологии КХТО:

а – Ст3; *б* – 40Х; *в* – 20Х13; *г* – 40Х13; *д* – 12Х18Н10Т

Fig. 3. Results of electron microprobe analysis of diffusion-saturated chromium coatings formed using the *CDS* technology:

а – St3; *б* – 40-Cr; *в* – 20-Cr13; *г* – 40-Cr13; *д* – 12-Cr18-Ni10-Ti

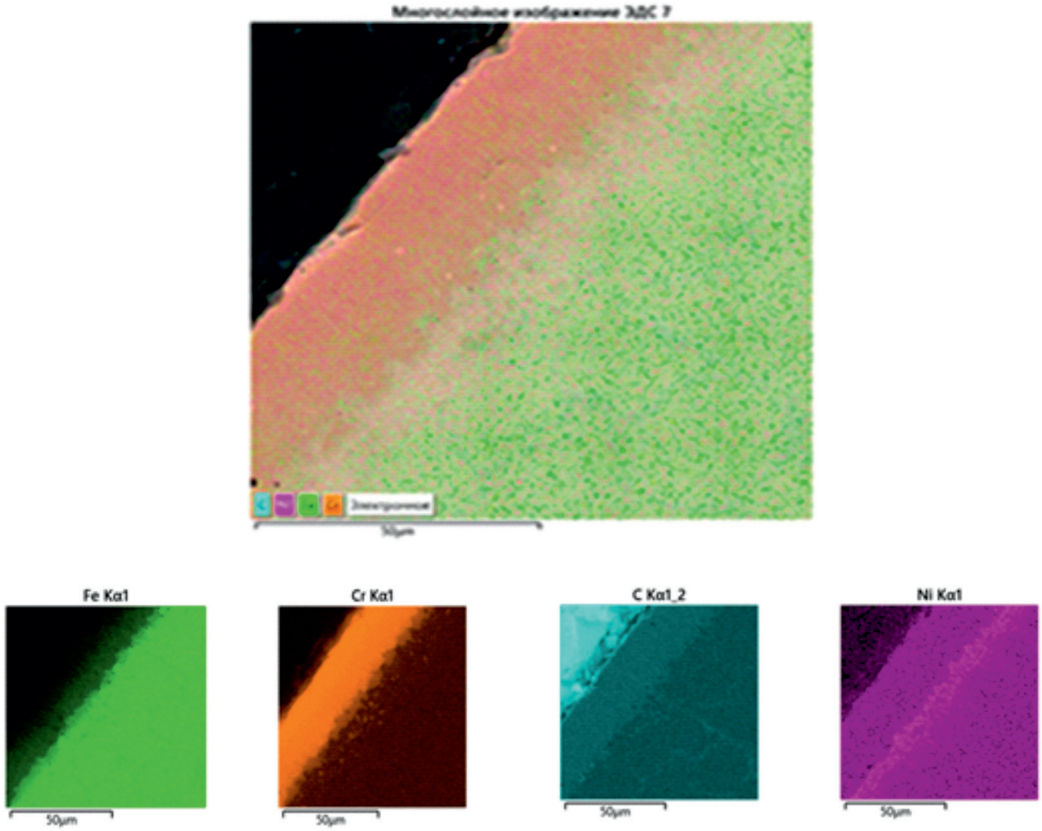


Рис 4. ЭДС изображение стали 40Х после КХТО

Fig. 4. EDS of 40-Cr steel after CDS

легированных покрытий по технологии ДЛЛЖР практически не изучен.

Как показали проведенные нами исследования, содержание углерода после проведения диффузионного легирования по технологии ДЛЛЖР, несмотря на наличие высокотемпературного воздействия (1025 °С), концентрация углерода в покрытии остается высокой в диапазоне от 1,2 до 0,8 % С по всей толщине основного слоя покрытия. После этого в переходном слое происходит плавное снижение концентрации углерода до концентрации углерода в покрываемой стали. Такая стабильность концентрации углерода в основном слое может быть объяснена образованием в этом слое карбидов хрома.

Кроме углерода, на диффузию хрома в глубь покрытия оказывают влияние и легирующие элементы, содержащиеся в легируемой стали. Так, например, при поверхностном легировании хромом с применением КХТО стали 20Х13 концентрация хрома остается практически постоянной (более 60 %) на глубине 15 мкм. В то же время при поверхностном легировании концентрация хрома более 60 % у стали Ст 3 не превышает глубину 8 мкм, стали 40Х– 7,5 мкм, стали 40Х13 – 7 мкм, стали 12Х18Н10Т – 6 мкм. Данные явления, происходящие при формировании диффузионно-легированных хромовых покрытий на сталях, содержащих карбидообразующие элементы, каким является хром, объясняется образованием карбидов хрома, диффундирующего из технологической среды, в данном случае из легкоплавкого жидкометаллического раствора.

Кроме этого несмотря на то, что при поверхностном легировании сталей диффузия легирующего элемента хрома зависит от элементного состава покрываемых сталей, содержание хрома на поверхности имеет примерно равное процентное содержание. Так, концентрация хрома на поверхности стали Ст 3 составила 66,8 %; в стали 40Х – 64,22 %; в стали 20Х13 – 62,54 %;в стали 40Х13 –63,18 %; в стали 12Х18Н10Т –64,77 %. Это может быть объяснено примерно одинаковой концентрацией углерода в поверхностных слоях покрываемых сталей, вследствие того что они подвергались предварительной цементации при одних и тех же режимах. Этим также объясняется пониженное содержание хрома на поверхности покрытий.

Влияние состава стали, обрабатываемой с применением КХТО при одних и тех же режимах, на общую толщину диффузионно-легированного покрытия также отсутствует. Общая толщина диффузионно-легированных покрытий, сформированных на всех исследуемых нами сплавах, лежит в пределах от 17 до 17,5 мкм.

Выводы

1. Установлено, что покрытия, формирующиеся в процессе ДЛЛЖР, значительно отличаются от покрытий, получаемых путем проведения КХТО. При одинаковых режимах хромирования в процессах ДЛЛЖР и КХТО формируются многослойные покрытия, минимум – основной слой и переходные слои, однако элементно-фазовый состав, концентрационное распределение легирующих элементов в формирующихся покрытиях различны.

2. Проведение КХТО приводит к формированию диффузионно-легированных покрытий значительно большей толщины, чем после ДЛЛЖР, при этом влияние состава покрываемой стали на общую толщину диффузионно-легированного покрытия отсутствует.

3. Концентрация хрома в поверхностных слоях диффузионно-легированного покрытия после ДЛЛЖР достаточно большая, и для диффузионных покрытий, в зависимости от состава покрываемой стали, лежит в пределах от 96,9 до 91,1 % Cr. После КХТО концентрация Cr на поверхности диффузионно-легированного покрытия значительно меньше и находится в пределах от 66,8 до 62,54 %.

4. После проведения КХТО при одних и тех же режимах элементный состав и концентрационное распределение элементов в формирующихся покрытиях определяются как элементным составом легируемой стали, так и значительным повышением концентрации углерода в поверхностных слоях покрываемых сталей от 2,4 % углерода, полученных на стали 40Х13, до 0,7 % углерода на аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Список литературы

1. Corrosion resistance of laser melting deposited Cu-bearing 316L stainless steel coating in 0.5 M H2SO4 solution / H. Zhao, Y. Ding, J. Li, G. Wei, M. Zhang // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 291. – P. 126572. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126572.

2. Development of superhydrophobic and corrosion resistant coatings on carbon steel by hydrothermal treatment and fluoroalkyl silane self-assembly / H.-Q. Fan, P. Lu, X. Zhu, Y. Behnamian, Q. Li // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 290. – P. 126569. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126569.

3. Microstructure and properties of Cr-AlN composite coating prepared by pack-cementation on the surface of Al-containing ODS steel / X. Hou, H. Wang, Q. Yang, Y. Chen, L. Chai, B. Song, N. Guo, S. Guo, Z. Yao // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 447. – P. 128842. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128842.

4. *Singh V., Singla A.K., Bansal A.* Impact of HVOF sprayed Vanadium Carbide (VC) based novel coatings on slurry erosion behaviour of hydro-machinery SS316 steel // Tribology International. – 2022. – Vol. 176. – P. 107874. – DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107874.

5. HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms / K. Yang, C. Chen, G. Xu, Z. Jiang, S. Zhang, X. Liu // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 19. – P. 1906–1921. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.181.

6. Microstructure and wear resistance of laser cladding Ti-Al-Ni-Si composite coatings / J. Liang, Y. Liu, S. Yang, X. Yin, S. Chen, C. Liu // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 445. – P. 128727. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128727.

7. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions / E. Dervishi, M. McBride, R. Edwards, M. Gutierrez, N. Li, R. Buntyn, D.E. Hooks // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 444. – P. 128652. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652.

8. *Bathini L., Prasad M.J.N.V., Wasekar N.P.* Development of continuous compositional gradient Ni-W coatings utilizing electrodeposition for superior wear resistance under sliding contact // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 445. – P. 128728. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128728.

9. Enhanced corrosion and wear resistance of gradient graphene-CrC nanocomposite coating on stainless steel / M. Zhang, X. Shi, Z. Li, H. Xu // Carbon. – 2021. – Vol. 174. – P. 693–709. – DOI: 10.1016/j.carbon.2020.12.007.

10. CrC/a-C:H coatings for highly loaded, low friction applications under formulated oil lubrication / M. Keunecke, K. Bewilogua, J. Becker, A. Gies, M. Grischke // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 270–278. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.085.

11. Failure mechanisms of CrN and CrAlN coatings for solid particle erosion resistance / D. Wang, S.-s. Lin, Z. Yang, Z.-f. Yin, F.-x. Ye, X.-y. Gao, Y.-

p. Qiao, Y.-n. Xue, H.-z. Yang, K.-s. Zhou // Vacuum. – 2022. – Vol. 204. – P. 111313. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111313.

12. Microstructure and properties of CrN coating via multi-arc ion plating on the valve seat material surface / C. Ji, Q. Guo, J. Li, Y. Guo, Z. Yang, W. Yang, D. Xu, B. Yang // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 891. – P. 161966. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161966.

13. Oxidation behavior and Cr-Zr diffusion of Cr coatings prepared by atmospheric plasma spraying on zircaloy-4 cladding in steam at 1300 C / Q. Li, P. Song, R. Zhang, Z. Li, Y. Wang, P. Du, J. Lu // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 203. – P. 110378. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110378.

14. *Sahu J.N., C S.* Development of hard and wear resistant surface coating on Ni-Cr-Mo steel by surface mechano-chemical carburization treatment (SMCT) // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 263. – P. 285–295. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.027.

15. Application of chemical-thermal treatment for hardening of sprayed with supersonic coatings / S. Nurakov, M. Belotserkovsky, T. Suleimenov, K. Aitlessov // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 149. – P. 360–364. – DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.149.

16. *Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

17. Improving the corrosion resistance of ferritic-martensitic steels at 600 °C in molten solar salt via diffusion coatings / T.M. Meißner, C. Oskay, A. Bonk, B. Grégoire, A. Donchev, A. Solimani, M.C. Galetz // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2021. – Vol. 227. – P. 111105. – DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111105.

18. *Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э.* Повышение износостойкости изделий из аустенитных сталей путем совмещения технологий цементации и диффузионного легирования в среде легкоплавких жидкометаллических расплавов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2020. – Т. 13 (4). – С. 502–511. – DOI: 10.17516/1999-494X-0241.

19. Mechanism and properties diffusion coating formation at carbide forming element base on surface of steel products / A.G. Sokolov, E.E. Bobylyov, I.D. Storogenko, R.A. Popov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2389. – P. 080001. – DOI: 10.1063/5.0063579.

20. Патент № 2768647 Российская Федерация, МПК C21D 1/78, C23C 2/10, C23C 8/22, C23C 8/46, C23C 8/66 (2006.01). Способ формирования износостойкого покрытия и коррозионно-стойкого покрытия на поверхности изделий из стали: заявл. 15.10.2021: опубл. 24.03.2022, Бюл. № 9 / Соколов А.Г., Бобылев Э.Э., Попов Р.А.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 98–109
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-98-109

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Diffusion coatings formation features, obtained by complex chemical-thermal treatment on the structural steels

Aleksandr Sokolov [a], ***Eduard Bobylyov*** [b, *], ***Roman Popov*** [c]

Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-8105-1429, sag51@bk.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-7754-1807, ebobylev@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0003-4875-5018, popov-romanya@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 03 October 2022
Revised: 03 November 2022
Accepted: 19 December 2022
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Diffusion
Coating
Chromium
Thermal-chemical treatment
Steel

Acknowledgements
Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. The main methods of increasing the efficiency of products made from structural steels are considered. A description of diffusion saturation from liquid metal media solutions (*DSLMMS*) is given. Also, complex diffusion saturation technology (*CDS*), including *DSLMMS* and carburization is shown. **The purpose of the work** is to reveal the effect of steel composition on the process of formation and elemental composition of diffusion-saturated surface layers (coatings) based on chromium, as well as to establish differences and regularities in the processes of formation of diffusion-saturated coatings after *DSLMMS* and *CDS*. **The methods of investigation.** Cylindrical specimens 20 mm in diameter and 30 mm long were subjected to *DSLMMS*. The specimens were made of carbon and alloyed steels: *St3*, *20-Cr13*, *40-Cr*, *40-Cr13*, *12-Cr18-Ni10-Ti*. At the same time, some of the specimens were previously subjected to vacuum cementation. An eutectic *Pb-Bi* with the specified content of *Cr* was used as a transport medium when executing *DSLMMS*. Metallographic studies were carried out on microsection prepared according to the standard method. Studies to determine the thickness of coatings and its structure were carried out on the *Dura Scan Falcon 500* Microhardness Tester. The elemental composition of the coatings was determined by the method of electron microprobe analysis on a *Tescan Lyra 3* scanning electron microscope with the *Oxford Ultim MAX PCMA* system. **Results and discussion.** As a result of the research, it was revealed that the formation of saturated coatings occurs with *DSLMMS* and *CDS*. At the same time, the thickness of the coatings and its elemental composition depend on the steel grade and the technology used. After *DSLMMS* concentration of *Cr* varies from 96.9% to 91.1%. At the same time, the maximum concentration of 96.9% is observed on steel St3. After *CDS*, on the surfaces of all steel samples, the concentration of *Cr* decreases in comparison with the coatings obtained by the *DSLMMS* technology on steels: St3 from 96.9% to 66.8%; *40-Cr* from 91.1% to 63.18%; *20-Cr13* from 93.18% to 62.54%; *12-Cr18-Ni10-Ti* from 92.92% to 64.77%. The total thickness of diffusion-saturated coatings formed on all the alloys studied ranges from 17 to 17.5 µm.

For citation: Sokolov A.G., Bobylyov E.E., Popov R.A. Diffusion coatings formation features, obtained by complex chemical-thermal treatment on the structural steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 98–109. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-98-109. (In Russian).

References

1. Zhao H., Ding Y., Li J., Wei G., Zhang M. Corrosion resistance of laser melting deposited Cu-bearing 316L stainless steel coating in 0.5 M H2SO4 solution. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 291, p. 126572. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126572.

2. Fan H.-Q., Lu P., Zhu X., Behnamian Y., Li Q. Development of superhydrophobic and corrosion resistant coatings on carbon steel by hydrothermal treatment and fluoroalkyl silane self-assembly. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 290, p. 126569. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126569.

3. Hou X., Wang H., Yang Q., Chen Y., Chai L., Song B., Guo N., Guo S., Yao Z. Microstructure and properties of Cr-AlN composite coating prepared by pack-cementation on the surface of Al-containing ODS steel. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 447, p. 128842. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128842.

*** Corresponding author**
Bobylyov Eduard Ed., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya st.,
350072, Krasnodar, Russian Federation
Tel.: +7-918-975-8933; **e-mail**: ebobylev@mail.ru

4. Singh V., Singla A.K., Bansal A. Impact of HVOF sprayed Vanadium Carbide (VC) based novel coatings on slurry erosion behaviour of hydro-machinery SS316 steel. *Tribology International*, 2022, vol. 176, p. 107874. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107874.

5. Yang K., Chen C., Xu G., Jiang Z., Zhang S., Liu X. HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 19, pp. 1906–1921. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.181.

6. Liang J., Liu Y., Yang S., Yin X., Chen S., Liu C. Microstructure and wear resistance of laser cladding Ti-Al-Ni-Si composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 445, p. 128727. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128727.

7. Dervishi E., McBride M., Edwards R., Gutierrez M., Li N., Buntyn R., Hooks D.E. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 444, p. 128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652.

8. Bathini L., Prasad M.J.N.V., Wasekar N.P. Development of continuous compositional gradient Ni-W coatings utilizing electrodeposition for superior wear resistance under sliding contact. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 445, p. 128728. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128728.

9. Zhang M., Shi X., Li Z., Xu H. Enhanced corrosion and wear resistance of gradient graphene-CrC nanocomposite coating on stainless steel. *Carbon*, 2021, vol. 174, pp. 693–709. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.12.007.

10. Keunecke M., Bewilogua K., Becker J., Gies A., Grischke M. CrC/a-C:H coatings for highly loaded, low friction applications under formulated oil lubrication. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 270–278. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.085.

11. Wang D., Lin S.-s., Yang Z., Yin Z.-f., Ye F.-x., Gao X.-y., Qiao Y.-p., Xue Y.-n., Yang H.-z., Zhou K.-s. Failure mechanisms of CrN and CrAlN coatings for solid particle erosion resistance // Vacuum. – 2022. – Vol. 204. – P. 111313. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111313.

12. Ji C., Guo Q., Li J., Guo Y., Yang Z., Yang W., Xu D., Yang B. Microstructure and properties of CrN coating via multi-arc ion plating on the valve seat material surface. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 891, p. 161966. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161966.

13. Li Q., Song P., Zhang R., Li Z., Wang Y., Du P., Lu J. Oxidation behavior and Cr-Zr diffusion of Cr coatings prepared by atmospheric plasma spraying on zircaloy-4 cladding in steam at 1300 C. *Corrosion Science*, 2022, vol. 203, p. 110378. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110378.

14. Sahu J.N., C S. Development of hard and wear resistant surface coating on Ni-Cr-Mo steel by surface mechano-chemical carburization treatment (SMCT). *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 263, pp. 285–295. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.027.

15. Nurakov S., Belotserkovsky M., Suleimenov T., Aitlessov K. Application of chemical-thermal treatment for hardening of sprayed with supersonic coatings. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 149, pp. 360–364. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.149.

16. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 256 p.

17. Meißner T.M., Oskay C., Bonk A., Grégoire B., Donchev A., Solimani A., Galetz M.C. Improving the corrosion resistance of ferritic-martensitic steels at 600 °C in molten solar salt via diffusion coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, vol. 227, p. 111105. DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111105.

18. Sokolov A.G., Bobylyov E.E. Povyshenie iznosostoikosti izdelii iz austenitnykh stalei putem sovmeshcheniya tekhnologii tsementatsii i diffuzionnogo legirovaniya v srede legkoplavkikh zhidkometallicheskikh rasplavov [Increase of durability of austenitic steel by overlap of carburization and diffusion saturation from liquid metal medium solutions technologies]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2020, vol. 13 (4), pp. 502–511. DOI: 10.17516/1999-494X-0241.

19. Sokolov A.G., Bobylyov E.E., Storogenko I.D., Popov R.A. Mechanism and properties diffusion coating formation at carbide forming element base on surface of steel products. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2389, p. 080001. DOI: 10.1063/5.0063579.

20. Sokolov A.G., Bobylev E.E., Popov R.A. *Sposob formirovaniya iznosostoikogo pokrytiya i korrozionno-stoikogo pokrytiya na poverkhnosti izdelii iz stali* [Method of forming a wear-resistant coating and a corrosion-resistant coating on the surface of steel products]. Patent RF, no. 2768647, 2022.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 110–130
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-110-130

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Исследование свойств сплавов на основе кремниевой бронзы, напечатанных с применением технологии электронно-лучевого аддитивного производства

Андрей Филиппов [a, *], *Екатерина Хорошко* [b], *Николай Шамарин* [c], *Евгений Колубаев* [d], *Сергей Тарасов* [e]

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0003-0487-8382, avf@ispms.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-9078-5662, eskhoroshko@gmail.com,
[c] https://orcid.org/0000-0002-4649-6465, shnn@ispms.ru, [d] https://orcid.org/0000-0001-7288-3656, eak@ispms.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0003-0702-7639, tsy@ispms.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.51

История статьи:
Поступила: 20 января 2023
Рецензирование: 25 января 2023
Принята к печати: 01 февраля 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Аддитивные технологии
Кремниевая бронза
Структура
Фазовый состав
Механические свойства
Коррозия
Трение

Финансирование:
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00084), https://rscf.ru/project/21-79-00084/.

Благодарности:
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивные технологии позволяют сократить затраты на материалы за счет сокращения припусков под окончательную размерную механическую обработку заготовок. Для таких дорогостоящих материалов, как медь и медные сплавы, данный способ является во многом привлекательным с точки зрения повышения ресурсоэффективности при производстве. Эксплуатационные свойства сплава БрКМц 3-1, изготовленного с применением аддитивных технологий, изучены не в полной мере и требуют проведения дополнительных исследований. **Целью работы** является исследование структурно-фазового состояния, механических и эксплуатационных свойств образцов бронзы БрКМц 3-1, напечатанных с применением технологии электронно-лучевого аддитивного производства. **В работе исследованы** образцы, изготовленные из проволоки БрКМц 3-1, с разной величиной тепловложения, часть из которых была подвергнута термической и механической обработке, а также образцы, изготовленные с применением мультипроволочной технологии. В работе используются такие **методы исследований,** как исследование коррозионной стойкости бронзовых образцов с помощью потенциостата, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, испытания на трение и рентгенофазовый анализ. **Результаты и обсуждение.** Обработка образцов посредством пластической деформации сжатием и последующего отжига привела к наиболее серьезным структурным изменениям. На основе рентгенофазового анализа установлено, что более высокое содержание кремния наблюдается в случае добавки к бронзе силуминов. Исследование механических свойств показало, что наиболее высокими прочностными свойствами обладают образцы, напечатанные с применением мультипроволочной технологии. При проведении трибоиспытаний выявлено колебание величины коэффициента трения, обусловленное схемой проведения эксперимента и комбинированным адгезионно-окислительным механизмом изнашивания образцов. Добавка к бронзе 10 вес.% алюминиевого филамента в процессе аддитивного производства является эффективным средством для повышения устойчивости материала к электрохимической коррозии и повышения его износостойкости.

Для цитирования: Исследование свойств сплавов на основе кремниевой бронзы, напечатанных с применением технологии электронно-лучевого аддитивного производства / А.В. Филиппов, Е.С. Хорошко, Н.Н. Шамарин, Е.А. Колубаев, С.Ю. Тарасов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 110–130. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-110-130.

Введение

Кремниевые бронзы используются в промышленности для производства изделий, к которым предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости и износостойкости [1]. В свою очередь, медь и медные сплавы явля-

***Адрес для переписки**
Филиппов Андрей Владимирович, к.т.н., зав. лабораторией
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
пр. Академический 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (999) 178-13-40, **e-mail:** avf@ispms.ru

ются достаточно дорогостоящими материалами. Следовательно, разработка методов повышения ресурсоэффективности при производстве изделий из этих материалов является важной научно-технической задачей. В этом направлении технологии аддитивного производства могут предоставить различные варианты по решению задачи сокращения затрат на материалы путем значительного сокращения припусков под окончательную размерную механическую обработку заготовок [2]. В то же время одной из главных проблем аддитивного производства изделий из меди и ее сплавов является окисление межслойных границ, из-за чего существенно ухудшаются физико-механические свойства напечатанных изделий. В связи с этим трехмерную печать следует проводить в условиях действия защитных газов или в вакууме [3].

Важным преимуществом современных аддитивных технологий является возможность управления режимами печати, что позволяет варьировать условия плавления материала в широком температурном диапазоне. Это особенно важно при изготовлении изделий с пространственно-сложной формой и неоднородной толщиной стенок, так как толщина и высота стенки, а также совокупный объем напечатанного материала существенно влияют на условия теплоотвода [4] и соответственно формирование ванны расплава.

Проволочная технология электронно-лучевого аддитивного производства осуществляется в вакууме с применением в качестве филамента тонкой проволоки. Такой вид филамента является менее дорогостоящим по сравнению с порошком, что делает эту технологию менее затратной. Кроме того, данная технология позволяет использовать несколько проволок для подачи их в зону печати в различном соотношении. В результате появляется возможность печати новых сплавов с разными легирующими элементами, а также сплавов и композитов из разнородных материалов [5–8].

Технология электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП, от англ. *Wire-feed electron-beam additive manufacturing*, EBAM) активно используется для получения изделий из никелевых жаропрочных сплавов [9–12], интерметаллидных соединений, таких как TiAl [13–15], магнитомягких материалов на основе железа [16], алюминиевых сплавов [17, 18], магниевых сплавов [19], а также бронз [20, 21].

В отечественной промышленности наиболее распространенной является кремниевая бронза марки БрКМц 3-1. Она используется в деталях химической промышленности, в авиационной технике, автомобиле- и судостроении. В то же время за рубежом выпускается ее аналог, содержащий ~7 вес.% Al и ~2 вес.% Si. Такой сплав обладает более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с БрКМц 3-1. Следовательно, получение аналогов данного сплава является актуальной задачей. Для её решения можно воспользоваться мультипроволочной технологией электронно-лучевого аддитивного производства, которая реализуется путем добавления в ванну расплава двух и более проволок. В контексте получения сплавов системы Cu-Al-Si можно воспользоваться алюминиевым филаментом и добавлять его в процессе печати бронзы в соотношении 10:1, что должно обеспечить требуемый состав сплава. Ранее технология электронно-лучевого аддитивного производства успешно применялась для получения образцов из сплава БрКМц 3-1 [22] и сплава системы Cu-Al-Si-Mn [23]. Однако в известных на сегодняшний день работах эксплуатационные свойства этого сплава, изготовленного с применением аддитивных технологий, исследованы не в полной мере. Остаются неизученными также свойства сплавов, напечатанных на основе кремниевой бронзы с добавлением алюминиевого филамента.

Цель работы состоит в исследовании структурно-фазового состояния, механических и эксплуатационных свойств образцов бронзы БрКМц 3-1, напечатанных с применением технологии электронно-лучевого аддитивного производства.

Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований методом электронно-лучевого аддитивного производства были изготовлены образцы в виде тонких стенок (рис. 1).

Первая часть образцов была изготовлена из проволоки БрКМц 3-1 (C65500) с разной величиной тепловложения: режим 1 – 0,19 кДж/мм, режим 2 – 0,25 кДж/мм, режим 3 – 0,31 кДж/мм. Часть из этих образцов с наиболее крупнозерни-

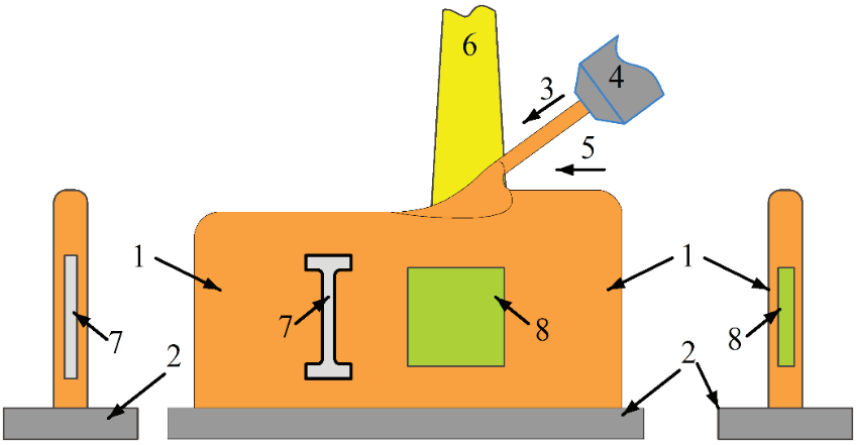


Рис. 1. Схема электронно-лучевого аддитивного производства и вырезки образцов для исследований:

1 – напечатанный материал; *2* – подложка; *3* – направление подачи проволоки; *4* – податчик проволоки; *5* – направление печати; *6* – электронный луч; *7* – образцы для испытаний на растяжение; *8* – образцы для испытаний на трение и коррозионную стойкость

Fig. 1. Scheme of electron beam additive manufacturing and cut-up sketch:

1 – printed material; *2* – substrate; *3* – wire feed direction; *4* – wire feeder; *5* – printing direction; *6* – electron beam; *7* – tensile test specimens; *8* – friction and corrosion resistance test specimen

стой структурой была подвергнута термической (отжиг при температуре 850 °С) и механической обработке (деформация сжатием на 10 % и последующий отжиг при 850 °С) для успешного изменения структурного состояния. Более подробная информация о режимах обработки и структурном состоянии этих образцов приведена в работе [22].

Вторая часть образцов была изготовлена с применением мультипроволочной технологии. Этот подход использовался для изменения состава образцов и оценки возможности управления их структурой и свойствами, а также получения сплава системы Cu-Al-Si с составом, близким к зарубежным аналогам (сплав C64200), использующимся в авиационной и морской технике. Для этого в ванну расплава направляли две проволоки: первая из БрКМц 3-1 – являлась базовой во всех случаях, а вторая – из добавочного сплава. В качестве добавок использовались технически чистый алюминий (99 % Al), а также сплавы АК5(AlSi5) и АК12(AlSi12). Соотношение скорости подачи проволок подбиралось таким образом, чтобы обеспечить добавление в сплав БрКМц 3-1 10 весовых процентов алюминия. В результате были получены три сплава: БрКМц 3-1 + 10 вес. % Al; БрКМц 3-1 + 10 вес. % АК5; БрКМц 3-1 + 10 вес. % АК12. Подробнее методика печати образцов изложена в работе [23].

Исследование коррозионной стойкости бронзовых образцов выполнено с помощью потенциостата Electrochemical Instruments P-45X путем проведения потенциодинамических испытаний по трехэлектродной схеме. В качестве коррозионно-активной среды использовался водный раствор 3,5 % NaCl. В результате получены поляризационные кривые, отражающие изменение потенциала и тока коррозии. Поляризационное сопротивление рассчитано на основе уравнения Батлера–Фольмера:

$$Rp = (\beta_a \beta_c) \,/\, \left(2,303 i_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)\right),$$

где β_a – наклон анодной ветви; β_c – наклон катодной ветви; i_{corr} – ток коррозии.

Потеря массы образцов оценивалась с помощью аналитических весов Sartorius CP124S.

Состояние поверхности бронзовых образцов после исследования коррозионной стойкости выполнялось с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus OLS-4100. Для выполнения качественной и количественной оценки характера коррозионных поврежде-

ний поверхности получены оптические изображения и оценена шероховатость.

Трение осуществлялось на трибометре Tribotechnic по схеме шарик-диск в условиях возвратно-поступательного сухого трения скольжения. В качестве образцов использовались пластины, вырезанные из напечатанных бронзовых стенок (см. рис. 1, поз. *8*). В качестве контртел использовались шарики из закаленной стали ШХ15. Исследование поверхности образцов бронзы и шариков после трения, а также измерение профиля сечения дорожек износа осуществлялись с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus OLS-4100.

Микротвердость измерялась с помощью твердомера Duramin-5 при нагрузке 50 Н. Оценка механических свойств при растяжении выполнена на испытательной машине Testsystem 110M-10.

Исследование фазового состава бронзовых образцов проводилось на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. Элементный состав определялся с помощью энергодисперсионного спектрального (ЭДС) анализа Octane Elect на растровом электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Apreo S LoVac.

Металлографические исследования структуры бронзовых образцов выполнены с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus OLS-4100.

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования структуры образцов

Изменение режимов печати закономерно сказалось на структуре образцов. По мере увеличения тепловложения происходит рост размеров зерна и изменяется их форма. При минимальном тепловложении (0,19 кДж/мм) формируется бимодальная структура с небольшими вытянутыми и равноосными зернами (рис. 2, *а*). При среднем тепловложении (0,25 кДж/мм) формируются зерна зигзагообразной формы (рис. 2. *б*), а при наи-

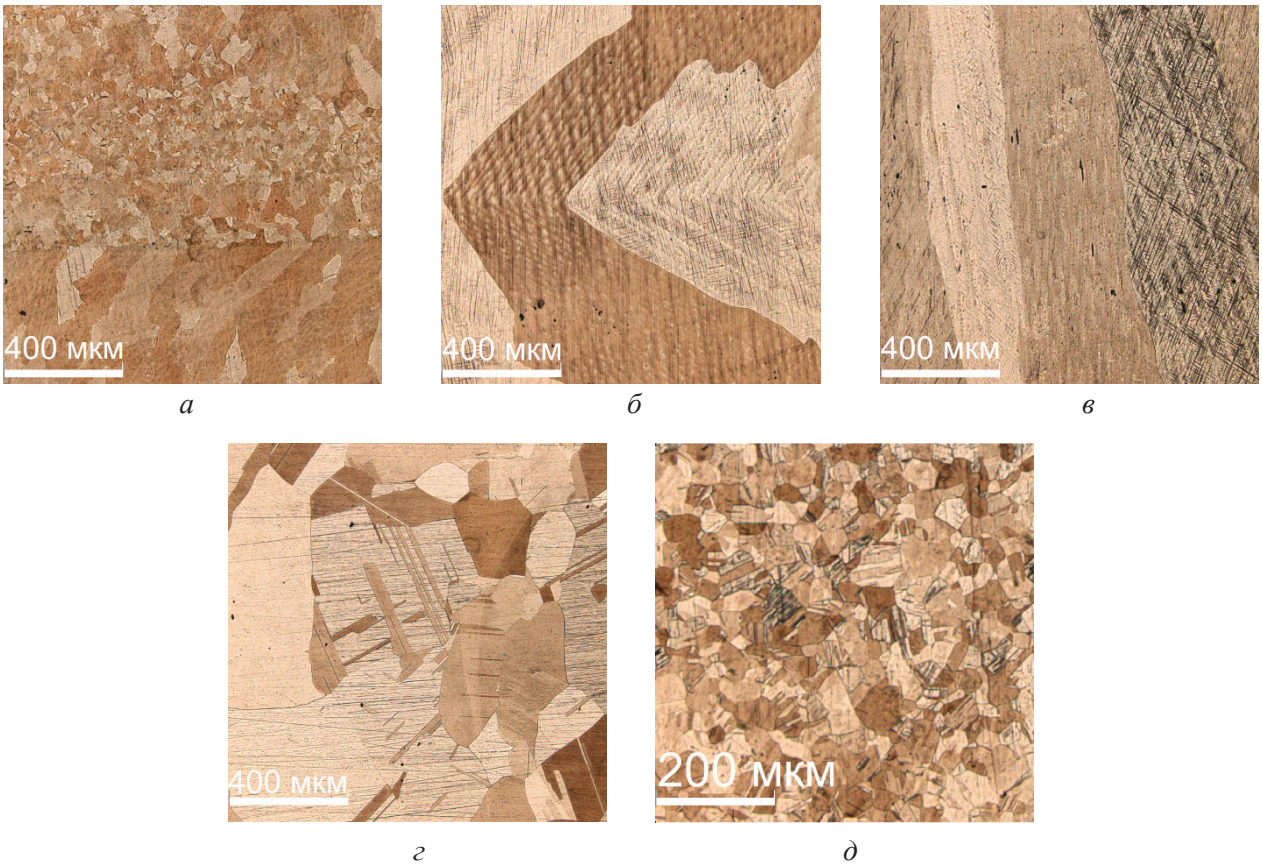


Рис. 2. Типичная микроструктура образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1. Режимы печати: *1* (*а*), *2* (*б*) и *3* (*в*); образцы после отжига (*г*), а также деформации и последующего отжига (*д*)

Fig. 2. Typical microstructure of specimens printed from C65500. Printing modes: *1* (*а*), *2* (*б*) and *3* (*в*); specimens after annealing (*г*), as well as after deformation and subsequent annealing (*д*)

большем (0,31 кДж/мм) – крупные столбчатые зерна (рис. 2, *в*). В результате отжига образцов с изначально столбчатыми зернами произошли изменения в структуре. Столбчатые зерна преобразовались в крупные неравноосные, а также сформировалось большое количество двойников отжига (рис. 2, *г*). Обработка образцов посредством пластической деформации сжатием и последующим отжигом привела к наиболее серьезным структурным изменениям. В результате сформировались небольшие равноосные зерна с большим количеством двойников отжига (рис. 2, *д*).

Изменение структурного состояния образцов обусловлено различиями в температурном градиенте. При низком тепловложении скорость кристаллизации увеличивается и в результате формируется более мелкозернистая микроструктура. В свою очередь, отжиг, а также деформация и последующий отжиг приводят к рекристаллизации материала [24, 25].

В результате печати сплава БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес.% Al сформировалась мелкозернистая структура почти с равноосными зернами размером 25…125 мкм (рис. 3, *а*). Также наблюдаются двойники отжига и включения вторичной фазы. При печати с добавлением сплавов АК5 и АК 12 структура образцов выглядит иначе. В обоих случаях сформировалась дендритная структура (рис. 3, *б*, *в*). Дендриты образуются в направлении выращивания стенок, а в междендритном пространстве находятся прослойки вторичной фазы толщиной 3…15 мкм.

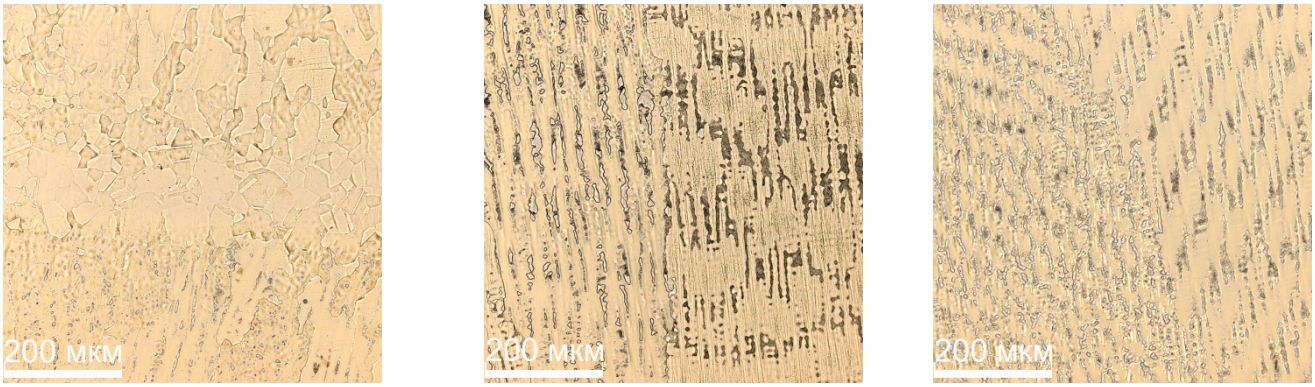
XRD и ЭДС анализ фазового состава образцов

На основе рентгенофазового анализа установлено во всех исследуемых образцах основной является α-фаза ГЦК меди (рис. 4). В образцах, напечатанных с добавлением алюминиевых филаментов, также отмечается формирование силицидов железа и кремния. Первые формируются из-за наличия железа в небольшом количестве в составе алюминиевых проволок, а вторые – как следствие неполного растворения кремния в сильнолегированном сплаве.

Наблюдаемые с помощью рентгенофазового анализа фазы не дают полного представления о фазовом составе образцов, напечатанных с применением алюминиевых филаментов. Согласно анализу известных фазовых диаграмм [26–31] в сплавах системы Cu-Al-Si могут быть две фазы: α-фаза с ГЦК-решеткой и γ-фаза с ГПУ-решеткой. В рассматриваемых образцах на основе ЭДС анализа установлено, что вторичная γ-фаза содержит ~7 ат. % Al; ~(9…10) ат. Si % и ~(0,5…0,6) ат. % Mn, в то время как в α-фазе содержится ~10 ат. % Al; ~(3,5…5) ат. % Si и ~(1,2…1,5) ат. % Mn. Более высокое содержание кремния закономерно наблюдается в случае добавки к бронзе силуминов.

Механические свойства образцов

Изменение режимов аддитивного производства, применение термической и механической обработки, а также легирование алюминием



а *б* *в*

Рис. 3. Типичная микроструктура образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1, с добавлением 10 вес. % Al (*а*), 10 вес.% АК5 (*б*) и 10 вес.% АК12 (*в*)

Fig. 3. Typical microstructure of specimens printed from C65500 with the addition of 10 wt.% Al (*а*), 10 wt.% Al–5Si (*б*) and 10 wt.% Al-12Si (*в*)

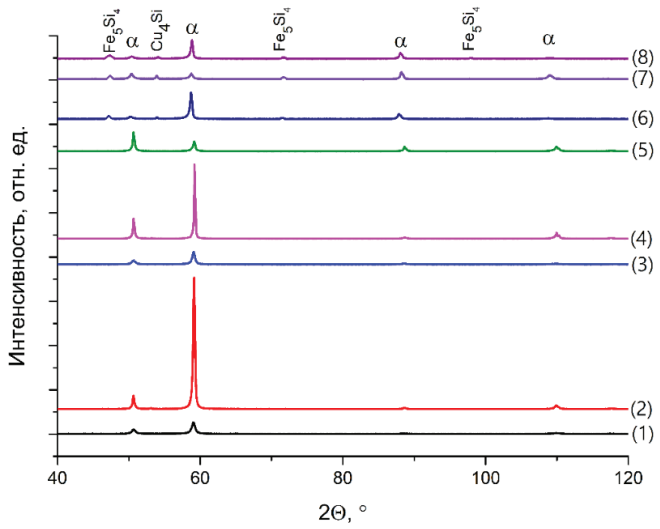


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента. Режимы печати: 1 (*1*), 2 (*2*) и 3 (*3*); образцы после отжига (*4*), деформации и последующего отжига (*5*); образцы с добавлением 10 вес. % Al (*6*), 10 вес. % АК5 (*7*) и 10 вес. % АК12 (*8*)

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of specimens printed from C65500 and with the addition of aluminum filament. Printing modes: 1 (*1*), 2 (*2*) and 3 (*3*). Specimens after annealing (*4*), deformation and subsequent annealing (*5*). Specimens with the addition of 10 wt.% Al (*6*), 10 wt.% Al–5Si (*7*) and 10 wt.% Al-12Si (*8*)

путем использования мультипроволочной технологии позволили получить образцы не только с разной структурой, но и механическими свойствами. Исходя из результатов механических испытаний на растяжение видно, что наиболее высокими прочностными свойствами обладают образцы, напечатанные с применением мультипроволочной технологии (табл. 1). Кроме того, в этих образцах, за исключением сплава БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % Al, наблюдается достаточно высокая пластичность. Следовательно, двухфазная структура образцов, напечатанных с добавлением силуминов АК5 и АК12, является как прочной, так и обладающей существенным ресурсом пластичности. Более подробное исследование прочности рассматриваемых образов представлено в работах [22, 23].

Изменения в структуре материала также отразились и на микротвердости образцов (рис. 5). Термическая обработка ожидаемо снизила микротвердость за счет удаления остаточных напряжений. Как и в случае с прочностью, образцы с двухфазной структурой обладают более высокой твердостью по сравнению с однофазными. Увеличение микротвердости составило 140…215 %.

Таблица 1

Table 1

Механические свойства образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента

Mechanical properties of specimens printed from C65500 and with the addition of aluminum filament

Обозначение образца / Specimen designation	Условный предел текучести, МПа / Offset yield strength, MPa	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	Деформация до разрушения, % / Strain-to-fracture, %
БрКМц 3-1 (режим 1) / C65500 (mode 1)	89	242	83
БрКМц 3-1 (режим 2) / C65500 (mode 2)	93	294	75
БрКМц 3-1 (режим 3) / C65500 (mode 3)	82	253	114
БрКМц 3-1 (отжиг) /C65500 (annealing)	92	301	76
БрКМц 3-1 (деформация + отжиг) / C65500 (deformation + annealing)	75	318	91
БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % Al / C65500 (10 wt.% Al)	203	434	21
БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % АК5 / C65500 (10 wt.% Al–5Si)	150	394	67
БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % АК12 / C65500 (10 wt.% Al–12Si)	186	448	57

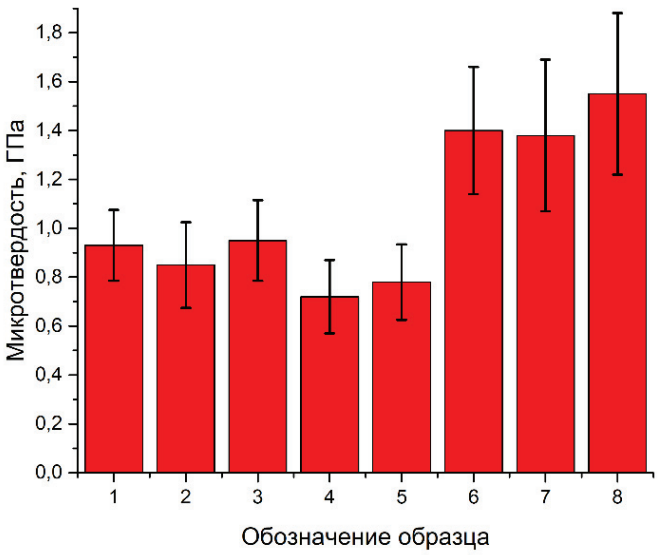


Рис. 5. Микротвердость образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента. Режимы печати: 1 (*1*), 2 (*2*) и 3 (*3*); образцы после отжига (*4*), деформации и последующего отжига (*5*); образцы с добавлением 10 вес. % Al (*6*), 10 вес. % АК5 (*7*) и 10 вес. % АК12 (*8*)

Fig. 5. Microhardness of specimens printed from C65500 and with the addition of aluminum filament. Printing modes: 1 (*1*), 2 (*2*) and 3 (*3*); specimens after annealing (*4*), deformation and subsequent annealing (*5*); specimens with the addition of 10 wt.% Al (*6*), 10 wt.% Al–5Si (*7*) and 10 wt.% Al–12Si (*8*)

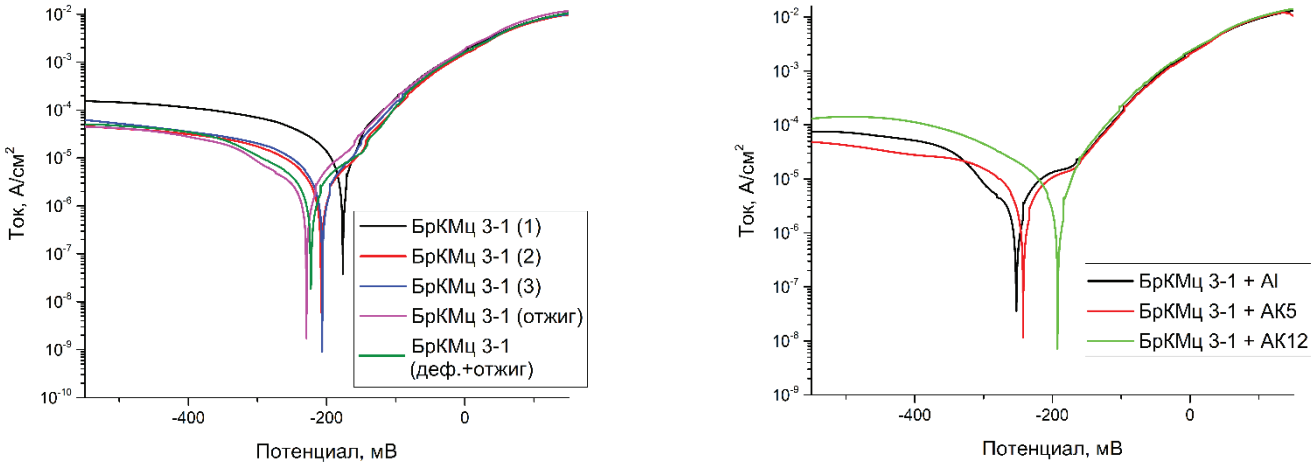
Коррозия

Указанные выше различия в структурном и фазовом состоянии исследуемых образцов сказались не только на их механических свойствах, но и на коррозионной стойкости. На рис. 6 приведены потенциодинамические поляризационные кривые, которые регистрировались в ходе проведения исследования электрохимической коррозии. Во всех рассматриваемых случаях в катодной части кривых потенциал изменяется без существенных колебаний. В анодной части кривых потенциал изменяется подобно катодной, но наблюдается небольшая область с замедляющимся ростом потенциала, которая может указывать на пассивацию поверхности образца. Для образца, подвергнутого последовательной деформационной обработке и отжигу, этот участок наиболее длительный (рис. 6, *а*). Следовательно, данный образец является наиболее устойчивым к воздействию коррозионно-активной среды, что может быть вызвано более активным образованием пленок оксидов алюминия и меди, сдерживающих анодное растворение образца. Такое повышение химической активности может быть следствием измельчениям структуры материала, сопровождающееся увеличением протяженности границ зерен. Границы служат источником активных ионов, вступающих в реакцию с раствором в электрохимической ячейке и образующих пассивные оксидные пленки. Кроме того, полученные результаты указывают на отсутствие питтинга на поверхности всех образцов.

В результате обработки данных установлены параметры электрохимического потенциала образцов. Потенциал коррозии (табл. 2) для образцов, напечатанных с низким (режим 1), средним (режим 2) и высоким (режим 3) тепловложением, составляет –178 мВ, –210 мВ и –202 мВ, соответственно. Применение отжига, а также деформационной обработки с последующим отжигом приводят к снижению величины потенциала коррозии. Ток коррозии для этой группы образцов изменяется незначительно (от 5,5 до 5,74 мкА).

Потенциодинамические поляризационные кривые для второй группы образцов, напечатанных с добавлением алюминиевого филамента, представлены на рис. 6, *б*. По своему характеру они подобны образцам напечатанной кремниевой бронзы (рис. 6, *а*). Исключение составляет образец, напечатанный с добавлением сплава АК12. В данном случае участка пассивации поверхности не наблюдается и анодное растворение начинается незамедлительно. Для этих образцов потенциал коррозии находится в диапазоне от –193 мВ до –251 мВ, что в целом близко по величине к образцам, напечатанным из кремниевой бронзы (табл. 2). При этом величина тока коррозии для образца БрКМц 3-1+10 вес. % АК5 является наименьшей, а для образцов БрКМц 3-1+10 вес. % Al и БрКМц 3-1+0 вес. % АК12 наибольшей из рассматриваемых в данной работе.

Количественная оценка коррозионной стойкости на основе обработки поляризационных кривых может быть получена в результате расчета поляризационного сопротивления (см. уравнение Батлера–Фольмера). Величина R_p характеризует, насколько образец устойчив к окислению по отношению к приложенному потенциалу. Исходя из полученных данных следует, что



а *б*

Рис. 6. Поляризационные кривые для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 (*а*) и с добавлением алюминиевого филамента (*б*)

Fig. 6. Polarization curves for specimens printed from C65500 (*a*) and with the addition of aluminum filament (*б*)

Таблица 2

Table 2

Параметры кривых Тафеля по данным потенциодинамических испытаний образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента

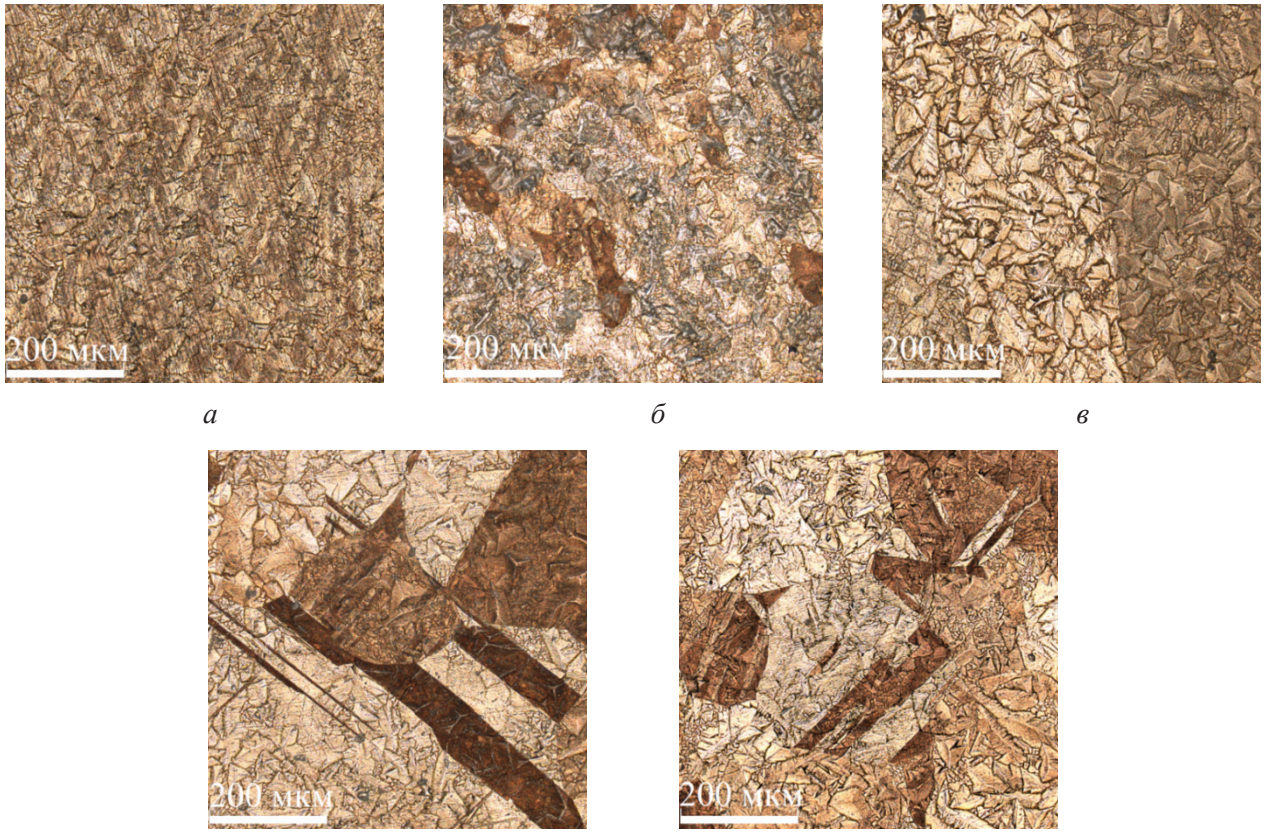
Parameters of Taffel curves according to the data of potentiodynamic tests of specimens printed from C65500 and with the addition of aluminum filament

Обозначение образца / Specimen designation	Параметры поляризационных кривых / Parameters of polarization curves				
	E_{corr}, мВ / E_{corr}, mV	I_{corr}, мкА / I_{corr}, μA	β_a	β_c	R_p, кОм / R_p, kOhm
БрКМц 3-1 (1) / C65500 (1)	–178	5,54	0,030371	–0,02667	1,7
БрКМц 3-1 (3) / C65500 (3)	–210	5,74	0,067731	–0,05687	2,7
БрКМц 3-1 (7) / C65500 (7)	–202	5,6	0,064345	–0,08164	2,4
БрКМц 3-1 (отжиг) / C65500 (annealing)	–229	5,71	0,069095	–0,10014	1,7
БрКМц 3-1 (деформация + отжиг) / C65500 (deformation + annealing)	–223	5,5	0,110449	–0,13455	4,8
БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % Al / C65500 (10 wt.% Al)	–251	6,6	0,168932	–0,12941	3,6
БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % АК5 / C65500 (10 wt.% Al–5Si)	–239	5,2	0,246156	–0,18557	6,3
БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % АК12 / C65500 (10 wt.% Al–12Si)	–193	8,4	0,116204	–0,13008	5,6

применение деформационной обработки с последующим отжигом способствует повышению поляризационного сопротивления образцов, напечатанных из кремниевой бронзы. В свою очередь, при печати образцов с добавлением алюминиевых филаментов наиболее эффективным с точки зрения повышения поляризационного сопротивления является добавление сплава АК5.

Для более подробной оценки воздействия коррозионно-активной среды на поверхность образцов проведен анализ ее состояния с использованием лазерного сканирующего микро-

скопа. После проведения испытаний на поверхности образцов сформировался микрорельеф и отдельные структурные элементы (зерна, двойники отжига и т. п.) стали отчетливо различимы. Следов питтинга на поверхностях кремниевой бронзы (рис. 7) и бронз, напечатанных с добавлением алюминиевого филамента (рис. 8), не выявлено. Границы зерен и двойников отжига не подверглись сколь-нибудь существенному растворению.

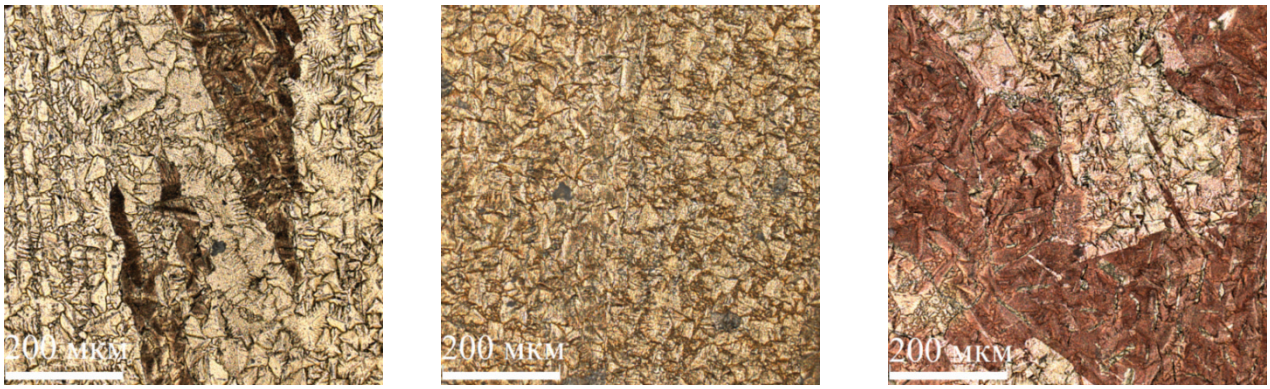


а *б* *в*

г *д*

Рис. 7. Изображения поверхности образцов бронзы БрКМц 3-1, напечатанных методом ЭЛАП, после коррозионных испытаний. Режимы печати: 1 (*а*), 2 (*б*) и 3 (*в*); образцы после отжига (*г*), деформации и последующего отжига (*д*)

Fig. 7. The surface of C65500 specimen, printed by the *EBAM* method, after corrosion tests. Printing modes: 1 (*а*), 2 (*б*) and 3 (*в*); specimen after annealing (*г*), deformation and subsequent annealing (*д*)



а *б* *в*

Рис. 8. Изображения поверхности образцов бронзы БрКМц 3-1 с добавлением 10 вес. % Al (*а*), 10 вес.% АК5 (*б*) и 10 вес.% АК12 (*в*) после коррозионных испытаний

Fig. 8. The surface of C65500 specimen with the addition of 10 wt.% Al (*а*), 10 wt.% Al–5Si (*б*) and 10 wt.% Al–12Si (*в*) after corrosion tests

В то же время визуально наблюдаемый микрорельеф не во всех случаях одинаков. Для количественной оценки этих различий была выполнена оценка шероховатости поверхности исследуемых образцов. Из полученных данных видно, что напечатанные из бронзы БрКМц 3-1 образцы после проведения испытаний (рис. 9) характеризуются наиболее существенной шероховатостью. Применение высокотемпературного отжига способствовало снижению среднеарифметического значения высоты неровностей (*Ra*) на 6…12 %. Наименьшая шероховатость наблюдается на поверхности образца, который после печати был пластически деформирован и отожжен (*Ra* = 0,275 мкм).

Добавление различных алюминиевых филаментов также сказалось и на шероховатости поверхностей образцов после их испытаний в коррозионно-активной среде. Судя по полученным данным, наименее выраженным рельефом (*Ra* = 0,296 мкм) обладает образец, напечатанный с добавлением сплава АК5. Исходя из полученных данных следует, что поверхности образцов с наименьшей шероховатостью окисляются более равномерно, что может указывать на их более высокую устойчивость к воздействию электролита.

Другой количественной характеристикой оценки коррозионной стойкости образцов является потеря массы. Для ее получения образцы взвешивались на аналитических весах до и после проведения испытаний. В результате определена потеря массы для всех исследуемых образцов (рис. 10). Высокотемпературный отжиг, а также пластическая деформация сжатием с последующим отжигом способствовали снижению потери массы на 15…30 % для образцов, напечатанных из кремниевой бронзы. Добавление алюминиевого филамента позволило дополнительно снизить потерю массы напечатанных образцов на 13…31 % относительно напечатанных и обработанных образцов бронзы БрКМц 3-1.

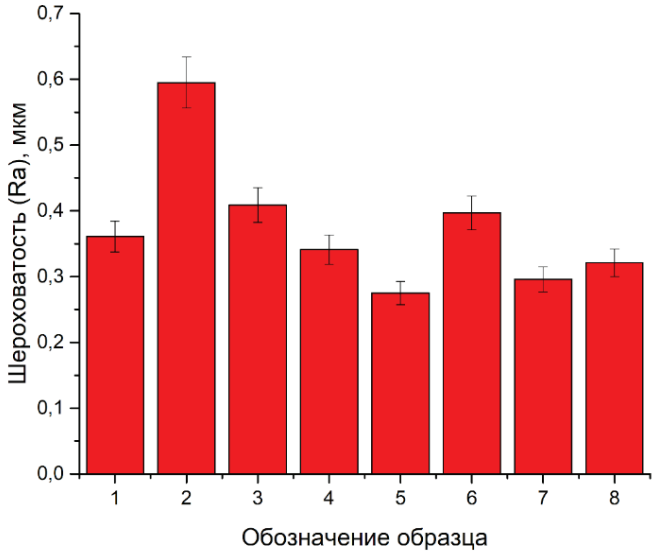


Рис. 9. Шероховатость поверхности после электрохимической коррозии для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента. Режимы печати: 1 (*1*); 2 (*2*) и 3 (*3*); образцы после отжига (*4*), деформации и последующего отжига (*5*); образцы с добавлением 10 вес. % Al (*6*), 10 вес. % АК5 (*7*) и 10 вес. % АК12 (*8*)

Fig. 9. Surface roughness after electrochemical corrosion of the C65500 specimen with the addition of aluminum filament. Printing modes: 1 (*1*), 2 (*2*) and 3 (*3*); samples after annealing (*4*), deformation and subsequent annealing (*5*); samples with the addition of 10 wt.% Al (*6*), 10 wt.% Al–5Si (*7*) and 10 wt.% Al–12Si (*8*)

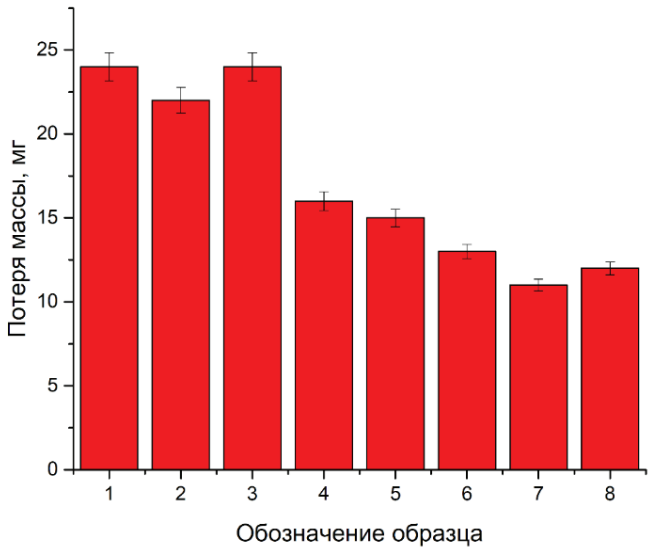


Рис. 10. Потеря массы после электрохимической коррозии для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента. Режимы печати: 1 (*1*), 2 (*2*) и 3 (*3*); образцы после отжига (*4*), деформации и последующего отжига (*5*); образцы с добавлением 10 вес. % Al (*6*), 10 вес. % АК5 (*7*) и 10 вес. % АК12 (*8*)

Fig. 10. Mass loss after electrochemical corrosion of the C65500 specimen with the addition of aluminum filament. Printing modes 1 (*1*); 2 (*2*) and 3 (*3*); samples after annealing (*4*), deformation and subsequent annealing (*5*); samples with the addition of 10 wt.% Al (*6*), 10 wt.% Al–5Si (*7*) and 10 wt.% Al–12Si (*8*)

Все указанные результаты согласованно указывают на повышение коррозионной стойкости образцов кремниевой бронзы за счет применения механической и термической обработки. В свою очередь, добавление сплава АК5 является наиболее эффективным средством для модификации материала с целью повышения его устойчивости к электрохимической коррозии.

Триботехнические испытания

Изменение структурного и фазового состояния, а также механических свойств сказалось и на результатах испытания образцов на трение и износ. С начала испытаний коэффициент трения принимает высокие значения для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 с разной величиной тепловложения (рис. 11). Затем он снижается приблизительно на 20 %, после чего начинает монотонно увеличиваться вплоть до достижения прежних высоких значений. При трении образца со структурой, сформированной в результате высокотемпературного отжига, наблюдаются существенные колебания величины КТ (достигают амплитуды в ~0,2), они занимают большую часть времени испытания. А при трении пластически деформированного и отожженного образца амплитуда колебаний КТ на завершающей стадии испытаний достигает ~0,25. Средняя величина КТ для образцов, напечатанных с низким (режим 1), средним (режим 2) и высоким (режим 3) тепловложением, составляет 0,52, 0,39 и 0,29 мВ соответственно. Для образца после высокотемпературного отжига КТ = 0,3, а для последовательно деформированного и отожженного КТ = 0,34. Высокая амплитуда колебаний коэффициента трения отчасти обусловлена схемой испытания. При возвратно-поступательном трении скорость скольжения является непостоянной величиной на всем участке дорожки трения. При достижении конечного участка пути трения скорость стремится к нулю, а затем быстро восстанавливается при начале движения в каждом новом цикле трения. В результате на крайних участках пути трения происходит небольшое изменение его условий, которое влияет на величину силы трения.

При трении образцов, напечатанных с добавлением алюминиевого филамента, наблюдается другой характер изменения коэффициента трения (рис. 12). С начала КТ увеличивается в течение ~150 с, что может соответствовать периоду приработки, а затем стабилизируется на некотором уровне. При этом величина КТ существенно снизилась по сравнению с бронзами, напечатанными без добавок алюминия. Средняя величина КТ составляет 0,184, 0,28 и 0,191 при трении образцов бронзы, напечатанных с добавлением 10 вес. % Al, АК5 и АК12 соответственно.

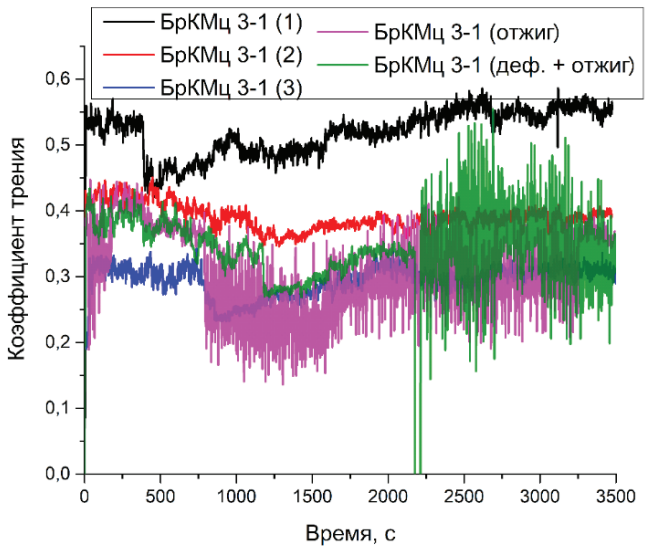


Рис. 11. Изменение величины коэффициента трения во время проведения триботехнических испытаний образцов бронзы БрКМц 3-1

Fig. 11. Change in the value of the coefficient of friction during tribological tests of C65500 specimens

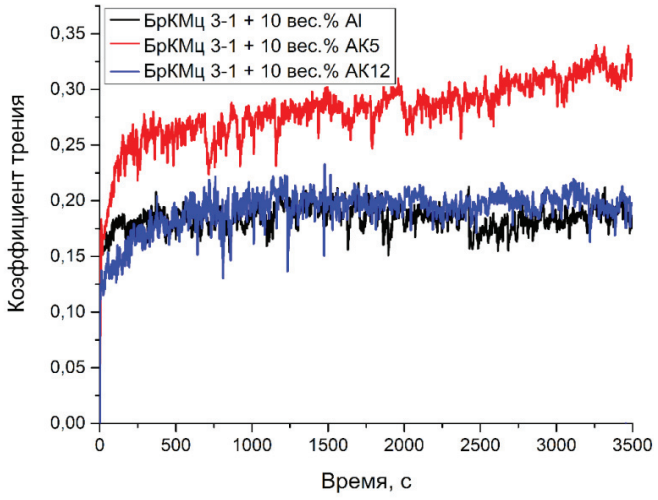


Рис. 12. Изменение величины коэффициента трения во время проведения триботехнических испытаний образцов бронзы БрКМц 3-1, напечатанных с добавлением алюминиевого филамента

Fig. 12. Change in the value of the coefficient of friction during tribological tests of C65500 specimens, printed with the addition of aluminum filament

Для объяснения причин колебаний коэффициента трения и изменения его величины были исследованы поверхности дорожек износа на бронзовых образцах (рис. 13, 15) и поверхности стальных шариков (рис. 14, 16). На поверхности образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1, сформировались ярко выраженные дорожки износа, на поверхности которых наблюдаются темные оксиды и следы механического повреждения. На периферии также видны следы деформации отдельных участков материала, что указывает на пластическое деформирование образцов под действием контртела в процессе трения.

На поверхностях стальных шариков (см. рис. 13) следов износа не выявлено, что является закономерным ввиду их значительно более высокой твердости по сравнению с образцами, напечатанными из бронзы БрКМц 3-1. В то же время на поверхностях шариков наблюдаются следы налипшей бронзы. Это обусловлено адгезионным механизмом изнашивания в рассматриваемой паре трения сталь–бронза. Толщина этих налипших слоев не превышает 1,5 мкм, что

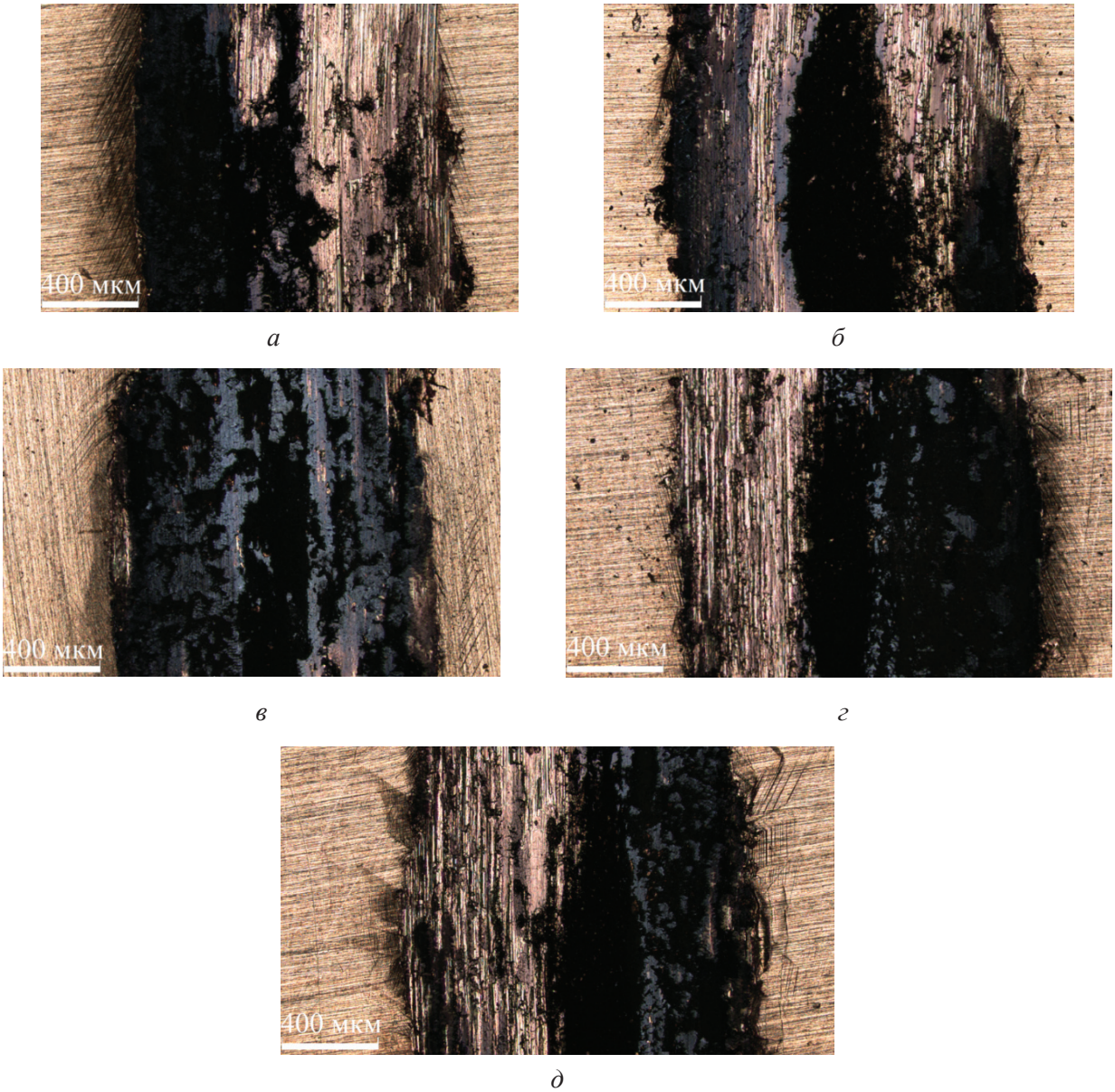


Рис. 13. Изображения поверхностей износа образцов бронзы БрКМц 3-1, напечатанной по 1 (*а*), 3 (*б*) и 7 (*в*) режимам ЭЛАП; отожженного образца (*г*); деформированного и отожженного образца (*д*)

Fig. 13. Images of the wear surfaces of C65500 bronze specimens, printed according to 1 (*а*); 3 (*б*) and 7 (*в*) EBAM modes; annealed specimen (*г*); deformed and annealed specimen (*д*)

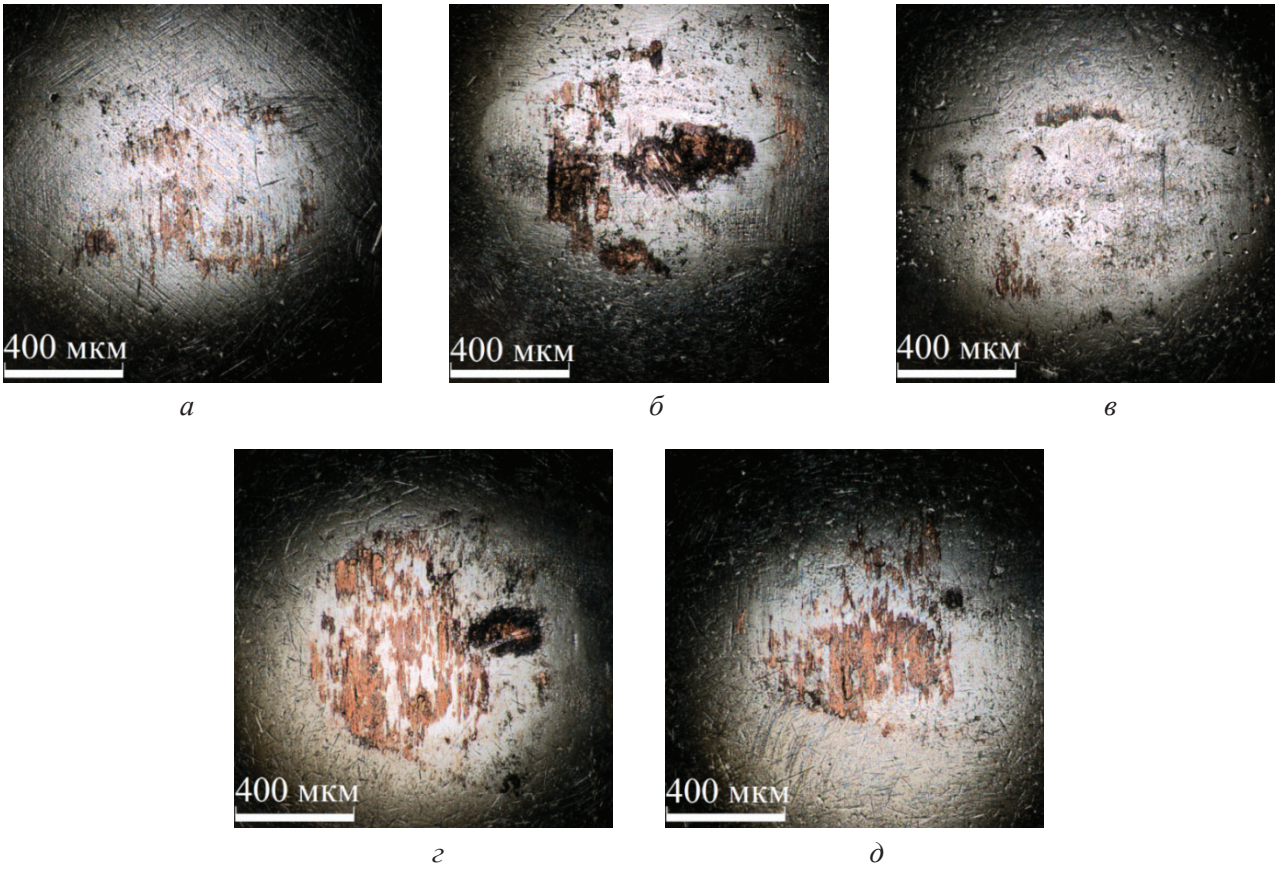


Рис. 14. Изображения поверхности стальных шариков после трения в паре с образцами бронзы БрКМц 3-1, напечатанными по 1 (*а*), 3 (*б*) и 7 (*в*) режимам ЭЛАП; отожженным образцом (*г*); деформированным и отожженным образцом (*д*)

Fig. 14. Images of the surface of steel balls after friction in a pair with C65500 bronze specimens, printed according to 1 (*а*), 3 (*б*) and 7 (*в*) EBAM modes, annealed specimen (*г*), deformed and annealed specimen (*д*)

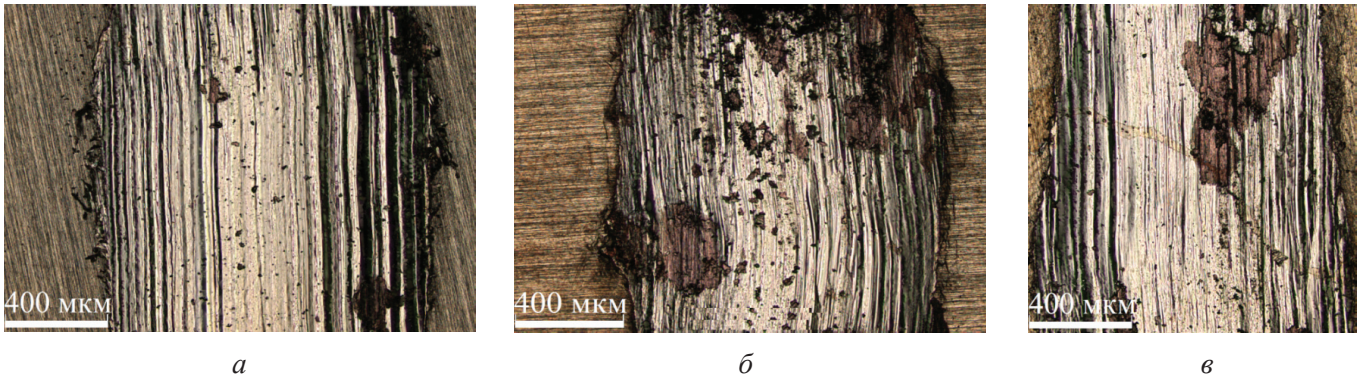
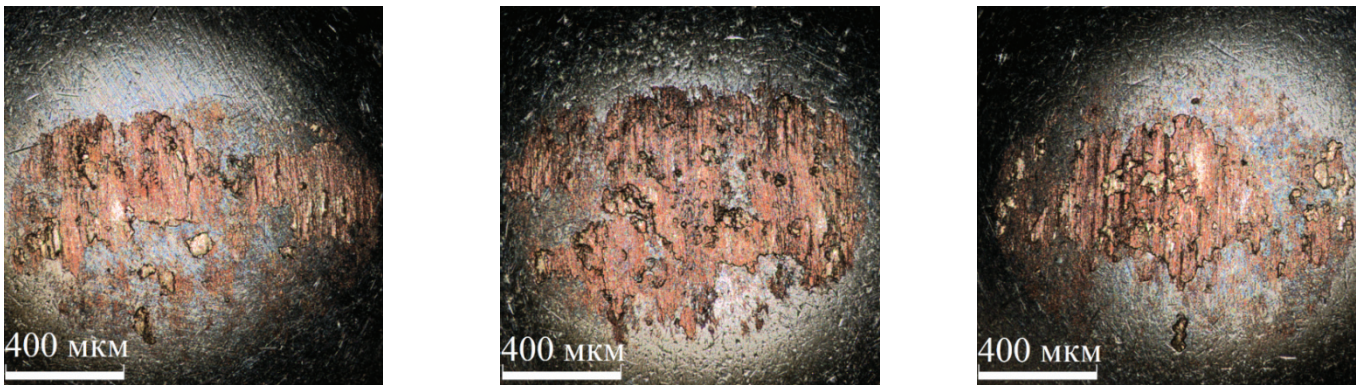


Рис. 15. Изображения поверхностей износа образцов бронзы БрКМц 3-1, напечатанных с добавлением 10 вес. % Al (*а*), 10 вес.% АК5 (*б*) и 10 вес.% АК12 (*в*)

Fig. 15. Images of the wear surfaces of C65500 bronze specimens, printed with the addition of 10 wt.% Al (*а*), 10 wt.% Al–5Si (*б*) and 10 wt.% Al–12Si (*в*)

было установлено на основе измерения трехмерного профиля поверхности с использованием лазерной сканирующей микроскопии.

Поверхность дорожек трения образцов бронзы (рис. 15), напечатанной с добавлением алюминиевого филамента, визуально существенно отличается от дорожек на поверхности образцов бронзы БрКМц 3-1 (см. рис. 13). Следов пластической деформации материала на периферии дорожек не наблюдается, а также отсутствует окисление поверхности в виде темных пятен. В то же время на периферии дорожек есть участки с



а *б* *в*

Рис. 16. Изображения поверхности стальных шариков после трения в паре с образцами бронзы БрКМц 3-1, напечатанных с добавлением 10 вес. % Al (*а*), 10 вес.% АК5 (*б*) и 10 вес.% АК12 (*в*)

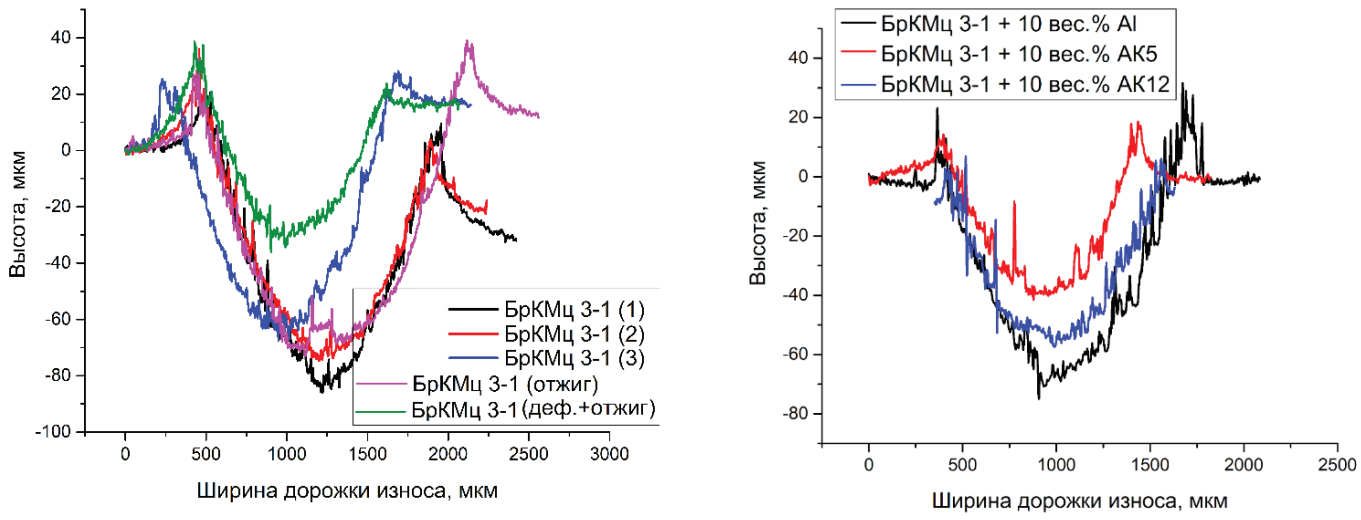
Fig. 16. Images of the surface of steel balls after friction in a pair with C65500 bronze specimens, printed with the addition of 10 wt.% Al (*a*), 10 wt.% Al–5Si (*б*) and 10 wt.% Al–12Si (*в*)

оттесненным в результате деформации материалом, который формирует наплывы. Поверхность шариков (рис. 16) покрыта существенным как по площади, так и по толщине слоем налипшей бронзы. Толщина налипшего материала неравномерная на всей площади и достигает 5…12 мкм на отдельных участках. Это указывает на более сильное адгезионное взаимодействие между материалами пары трения.

Полученные экспериментально данные указывают на то, что при сухом возвратно-поступательном трении скольжения при исследовании всех образцов выявлено колебание величины коэффициента трения, обусловленное схемой проведения эксперимента и комбинированным адгезионно-окислительным механизмом изнашивания образцов.

Количественное определение величины износа выполнено на основе определения профиля поперечного сечения дорожек износа по стандартной методике ASTM G133 – 05. Для этого с помощью программного обеспечения были построены профили поперечного сечения дорожек износа, сформировавшихся на поверхностях образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 (рис. 17, *а*) и бронзы с добавлением алюминиевого филамента (рис. 17, *б*). Полученные профили подтверждают наличие деформации материала и его оттеснение на периферию дорожек износа. Ключевой особенностью формирования наплывов является взаимосвязь их высоты с механическими свойствами образцов. Наиболее пластичные и наименее прочные/твердые образцы сильнее деформируются в процессе трения и на их поверхности формируются наиболее высокие наплывы. Более твердые образцы, напечатанные с добавлением алюминиевого филамента, менее подвержены пластической деформации в ходе трения, и высота формирующихся на их поверхности наплывов в 2–3 раза меньше (10…15 мкм), чем у образцов из бронзы (20…30 мкм).

В соотвествии со стандартной методикой на основе полученных профилей поперчного сечения дорожек износа определяется площадь их сечения. При этом наплывы не считаются износом. На основе полученных результатов (рис. 18) видно, что наибольшая площадь сечения дорожки износа образовалась при испытании отожженного образца бронзы БрКМц 3-1. Это обусловлено его низкой микротвердостью. В результате в условиях микроконтактного взаимодействия в паре трения материал проще деформируется и изнашивается. В свою очередь, применение деформации с последующим отжигом позволяет уменьшить износ на 15…30 % для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1. Это осуществляется мелкой струкутрой, которая более эффективно сопротивляется пластической деформации за счет наличия большого количества границ зерен. Из образцов, напечатанных с добавлением алюминиевого филамента, высокой износостойкостью выделяется образец, полученный с применением сплава АК5. Его износ на 25 % меньше, чем у самого износостойкого образца из бронзы БрКМц 3-1. Это обусловлено его высокой микротвердостью и механической прочностью. Снижение износостойкости сплавов, напечатанных с добавлением алю-



а *б*

Рис. 17. Профили поперечного сечения дорожек износа образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 (*а*) и с добавлением алюминиевого филамента (*б*)

Fig. 17. Cross-section profiles of the wear tracks of specimens, printed from bronze C65500 (*a*) and with the addition of aluminum filament (*б*)

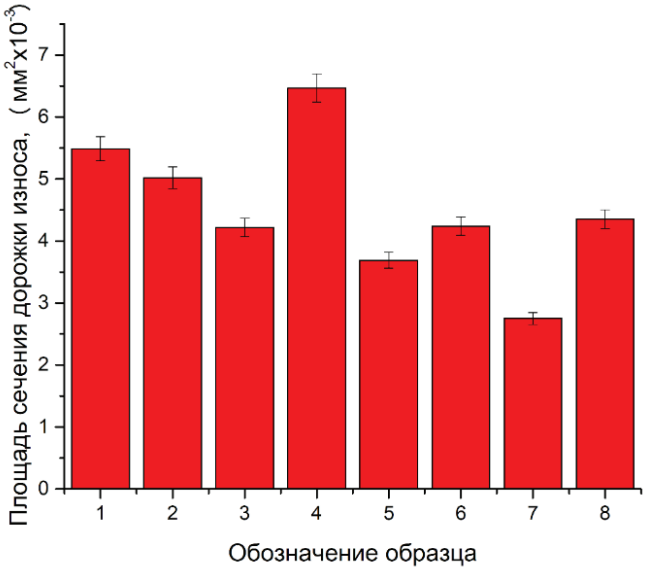


Рис. 18. Площадь поперечного сечения дорожек износа для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1 и с добавлением алюминиевого филамента. Режимы печати: 1 (*1*), 2 (*2*) и 3 (*3*); образцы после отжига (*4*), деформации и последующего отжига (*5*); образцы с добавлением 10 вес. % Al (*6*), 10 вес. % АК5 (*7*) и 10 вес. % АК12 (*8*)

Fig. 18. Cross-sectional area of the wear tracks for specimens printed from bronze C65500 and with the addition of aluminum filament. Printing modes 1 (*1*), 2 (*2*) and 3 (*3*); samples after annealing (*4*), deformation and subsequent annealing (*5*); samples with the addition of 10 wt.% Al (*6*), 10 wt.% Al–5Si (*7*) and 10 wt.% Al–12Si (*8*)

миния и АК12, обусловлено их механическими свойствами и фазовым составом. В первом случае сплав обладает низкой пластичностью, из-за чего в процессе трения в нем быстрее накапливаются структурные дефекты и приповерхностный слой быстрее разрушается, а следовательно, и изнашивается. Во втором случае добавление АК12 к БрКМц 3-1 сильно увеличивает количество силицидов, которые негативно сказываются на свойствах сплава. При трении мелкие силициды могут выделяться из матрицы и воздействовать на поверхность как абразивные частицы, усиливая износ поверхности бронзы. Кроме того, сплавы, напечатанные с добавлением алюминиевого филамента, менее склонны к образованию оксидных слоев. Из-за этого защитная функция оксидных слоев не выполняется, и износ происходит преимущественно за счет адгезионного механизма. В результате, несмотря на высокие механические свойства и микротвердость, снижение износа не столь существенное.

Выводы

В работе представлены результаты экспериментальных исследований кремниевой бронзы БрКМц 3-1, напечатанной с применением технологии электронно-лучевого аддитивного

производства. На основе полученных результатов установлено влияние условий печати и добавки алюминиевого филамента на структуру, механические свойства, а также их связь с коррозионной стойкостью и износостойкостью образцов.

1. Согласно комплексу выполненных исследований добавление 10 вес. % алюминиевого филамента приводит к формированию двухфазной структуры в напечатанных образцах. При этом основной фазой является α-фаза с ГЦК-решеткой, а γ-фаза с ГПУ-решеткой является вторичной и выделяется в процессе эвтектической реакции.

2. Формирование двухфазной структуры способствует увеличению прочности в ~1,2…1,9 раз и микротвердости в ~1,4…2,2 раза, а также снижению пластичности в 1,1-…,4 раза по сравнению с однофазными образцами.

3. В результате исследования коррозионной стойкости показано, что коррозия протекает без образования питтинга на поверхностях кремниевой бронзы и бронз, напечатанных с добавлением алюминиевого филамента.

4. Высокотемпературный отжиг, а также пластическая деформация сжатием с последующим отжигом способствовали снижению потери массы на 15…30 % для образцов, напечатанных из кремниевой бронзы.

5. Добавление алюминиевого филамента позволило дополнительно снизить потерю массы напечатанных образцов на 13…31 %, относительно образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1.

6. Применение деформации с последующим отжигом позволяет уменьшить износ на 15…30 % для образцов, напечатанных из бронзы БрКМц 3-1. Это обеспечивается мелкой струкутрой, которая более эффективно сопротивляется пластической деформации за счет наличия большого количества границ зерен.

7. Добавление 10 вес.% сплава АК5 в процессе печати бронзы способствовало повышению износостойкости материала на 25 % по сравнением с образцами из бронзы БрКМц 3-1.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий аддитивного производства изделий из кремниевых бронз.

Список литературы

1. *Schütze M., Feser R., Bender R.* Corrosion resistance of copper and copper alloys. – Wiley, 2011. – 752 p.

2. *Horn T.J., Gamzina D.* Additive manufacturing of copper and copper alloys // Additive Manufacturing Processes. – ASM International, 2020. – P. 388–418. – DOI: 10.31399/asm.hb.v24.a0006579.

3. *Adler L., Fu Z., Koerner C.* Electron beam based additive manufacturing of Fe3Al based iron aluminides – processing window, microstructure and properties // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 785. – P. 139369. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139369.

4. Evaluation of electron beam powder bed fusion additive manufacturing of high purity copper for overhang structures using in-situ real time backscatter electron monitoring / C. Ledford, C. Rock, M. Tung, H. Wang, J. Schroth, T. Horn // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 48. – P. 828–838. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.120.

5. Obtaining of bimetallic product from nickel superalloy and heat-resistant bronze by wire-feed electron beam additive manufacturing / A.V. Chumaevskii, E.A. Kolubaev, K.S. Osipovich, D.A. GurIanov, V.E. Rubtsov, S.Y. Nikonov, A.E. Boltrushevich // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. – P. 1231–1238. – DOI: 10.1007/s11182-022-02756-5.

6. A novel approach for powder bed-based additive manufacturing of compositionally graded composites / Z. Fu, J. Ye, M. Franke, C. Körner // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 56. – P. 102916. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.102916.

7. Characterization of gradient CuAl–B4C composites additively manufactured using a combination of wire-feed and powder-bed electron beam deposition methods / A.V. Filippov, E.S. Khoroshko, N.N. Shamarin, N.L. Savchenko, E.N. Moskvichev, V.R. Utyaganova, E.A. Kolubaev, A.Y. Smolin, S.Y. Tarasov // *Journal of Alloys* and *Compounds*. – 2021. – Vol. 859. – P. 157824. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824.

8. Aluminum Bronze/Udimet 500 composites prepared by electron-beam additive double-wire-feed manufacturing / A. Zykova, A. Chumaevskii, A. Panfilov, A. Vorontsov, A. Nikolaeva, K. Osipovich, A. Gusarova, V. Chebodaeva, S. Nikonov, D. Gurianov, A. Filippov, A. Dobrovolsky, E. Kolubaev, S. Tarasov // Materials (Basel). – 2022. – Vol. 15. – P. 6270. – DOI: 10.3390/ma15186270.

9. Small scale testing of IN718 single crystals manufactured by EB-PBF / M.R. Gotterbarm, M. Seifi, D. Melzer, J. Džugan, A.A. Salem, Z.H. Liu, C. Körner // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 36. – P. 101449. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101449.

10. Electron-optical in-situ crack monitoring during electron beam powder bed fusion of the Ni-base superalloy CMSX-4 / J. Bäreis, N. Semjatov, J. Renner, J. Ye, F. Zongwen, C. Körner // Progress in Additive Manufacturing. – 2022. – DOI: 10.1007/s40964-022-00357-9.

11. Features of the macro-, micro-, and fine structure of the nickel superalloy product material formed by the method of electron beam additive manufacturing / S. Fortuna, D. Gurianov, S. Nikonov, K. Ivanov, Y. Mironov, A. Vorontsov // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 8882. – DOI: 10.3390/ma15248882.

12. Assessment of structure and properties homogeneity after repairing of a nickel-based superalloy product by the electron beam additive technology / D. Gurianov, S. Fortuna, S. Nikonov, T. Kalashnikova, A. Chumaevskii, V. Utyaganova, E. Kolubaev, V. Rubtsov // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 1400. – DOI: 10.3390/cryst12101400.

13. Microstructure and properties of TiAl processed via an electron beam powder bed fusion capsule technology / J. Bieske, M. Franke, M. Schloffer, C. Körner // Intermetallics. – 2020. – Vol. 126. – P. 106929. – DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106929.

14. In-situ aluminum control for titanium aluminide via electron beam powder bed fusion to realize a dual microstructure / J. Knörlein, M.M. Franke, M. Schloffer, C. Körner // *Additive Manufacturing*. – 2022. – Vol. 59. – P. 103132. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.103132.

15. Impact of the power-dependent beam diameter during electron beam additive manufacturing: a case study with γ-TiAl / M. Reith, C. Breuning, M. Franke, C. Körner // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – P. 11300. – DOI: 10.3390/app122111300.

16. Electron beam-based additive manufacturing of Fe93.5Si6.5 (Wt.%) soft magnetic material with controllable magnetic performance / J. Yang, Z. Fu, J. Ye, D. Kübrich, C. Körner // Scripta Materialia. – 2022. – Vol. 210. – P. 114460. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2021.114460.

17. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample / V. Utyaganova, A. Filippov, S. Tarasov, N. Shamarin, D. Gurianov, A. Vorontsov, A. Chumaevskii, S. Fortuna, N. Savchenko, V. Rubtsov, E. Kolubaev // Materials Characterization. – 2021. – Vol. 172. – P. 110867. – DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110867.

18. Controlling the porosity using exponential decay heat input regimes during electron beam wire-feed additive manufacturing of Al-Mg alloy / V.R. Utyaganova, A.V. Filippov, N.N. Shamarin, A.V. Vorontsov, N.L. Savchenko, S.V. Fortuna, D.A. Gurianov, A.V. Chumaevskii, V.E. Rubtsov, S.Yu. Tarasov // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 108. – P. 2823–2838. – DOI: 10.1007/s00170-020-05539-9.

19. Processing, microstructure, and mechanical behavior of AZ31 magnesium alloy fabricated by electron beam additive manufacturing / X. Zhang, H. Shi, X. Wang, S. Zhang, P. Luan, X. Hu, C. Xu // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 938. – P. 168567. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168567.

20. *Wolf T., Fu Z., Körner C.* Selective electron beam melting of an aluminum bronze: microstructure and mechanical properties // Materials Letters. – 2019. – Vol. 238. – P. 241–244. – DOI: 10.1016/j.matlet.2018.12.015.

21. Formation of microstructure and mechanical characteristics in electron beam additive manufacturing of aluminum bronze with an in-situ adjustment of the heat input / A.P. Zykova, A.O. Panfilov, A.V. Chumaevskii, A.V. Vorontsov, S.Yu. Nikonov, E.N. Moskvichev, D.A. Gurianov, N.L. Savchenko, S.Yu. Tarasov, E.A. Kolubaev // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, iss. 5. – P. 811–817. – DOI: 10.1007/s11182-022-02701-6.

22. The effect of heat input, annealing, and deformation treatment on structure and mechanical properties of electron beam additive manufactured (EBAM) silicon bronze / A. Filippov, N. Shamarin, E. Moskvichev, N. Savchenko, E. Kolubaev, E. Khoroshko, S. Tarasov // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 3209. – DOI: 10.3390/ma15093209.

23. Structure and mechanical properties of Cu–Al–Si–Mn system-based copper alloy obtained by additive manufacturing / E.S. Khoroshko, A.V. Filippov, N.N. Shamarin, E.N. Moskvichev, V.R. Utyaganova, S.Yu. Tarasov, N.L. Savchenko, E.A. Kolubaev, V.E. Rubtsov, D.V. Lychagin // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64. – P. 333–339. – DOI: 10.1007/s11182-021-02333-2.

24. Casting of copper and copper alloys casting // ASM Handbook. Vol. 15. – ASM International, 2008. – P. 1026–1048.

25. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions / T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura, J.J. Jonas // Progress in Materials Science. – 2014. – Vol. 60. – P. 130–207. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.09.002.

26. *Ponweiser N., Richter K.W.* New investigation of phase equilibria in the system Al–Cu–Si // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 512. – P. 252–263. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.09.076.

27. *Iqbal J., Ahmed F., Hasan F.* Development of microstructure in silicon-aluminum-bronze // Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2008. – Vol. 3. – P. 47–53.

28. *Miettinen J.* Thermodynamic description of the Cu–Al–Si system in the copper-rich corner // Calphad. – 2007. – Vol. 31. – P. 449–456. – DOI: 10.1016/j.calphad.2007.05.001.

29. *Hisatsune C.* Constitution diagram of the copper–silicon–aluminium system // Memoirs of the College of Engineering, Kyoto Imperial University. – 1935. – Vol. 9. – P. 18–47.

30. *Wilson F.H.* The copper-rich corner of the copper-aluminum-silicon diagram // Metals Technology. – 1948. – Vol. 15. – P. 1–12.

31. Calorimetric measurements and assessment of the binary Cu–Si and ternary Al–Cu–Si phase diagrams / B. Hallstedt, J. Gröbner, M. Hampl, R. Schmid-Fetzer // Calphad. – 2016. – Vol. 53. – P. 25–38.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 110–130
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-110-130

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Study of the properties of silicon bronze-based alloys printed using electron beam additive manufacturing technology

Andrey Filippov [a, *], *Ekaterina Khoroshko* [b], *Nikolay Shamarin* [c], *Evgeny Kolubaev* [d], *Sergei Tarasov* [e]

Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0003-0487-8382, avf@ispms.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-9078-5662, eskhoroshko@gmail.com,
[c] https://orcid.org/0000-0002-4649-6465, shnn@ispms.ru, [d] https://orcid.org/0000-0001-7288-3656, eak@ispms.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0003-0702-7639, tsy@ispms.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 20 January 2023
Revised: 25 January 2023
Accepted: 01 February 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Additive technologies
Silicon bronze
Structure
Phase composition
Mechanical properties
Corrosion
Friction

Funding
This research was funded by Russian Science Foundation project № 21-79-00084, https://rscf.ru/project/21-79-00084/.

Acknowledgements
Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Additive technologies make it possible to curb material expenses by reducing allowances for the final dimensional machining of workpieces. For such expensive materials as copper and copper alloys, this method is considerably attractive from a perspective of increasing resource efficiency in production. The operational properties of the C65500 alloy manufactured using additive technologies have not been fully studied and require additional research. **The aim of the work** is to study the structural and phase state, mechanical and operational properties of C65500 bronze specimens printed using electron beam additive manufacturing technology. **In the work**, specimens made of C65500 wire with different heat input values are studied, some of which were subjected to thermal treatment and mechanical processing, as well as specimens, manufactured using multi-wire technology. **The work uses such research methods** as the study of corrosion resistance of bronze specimens using a potentiostat, confocal laser scanning microscopy, friction tests and X-ray phase analysis. **Results and discussion.** Processing of specimens by plastic deformation (compression) and subsequent annealing leads to the most serious structural changes. Based on X-ray phase analysis, it is found that higher silicon content is observed in the case of the addition of silumins to bronze. The study of mechanical properties shows that the specimens, printed using multi-wire technology, have the highest strength properties. During tribological testing, fluctuations in the value of the friction coefficient are revealed, due to the scheme of the experiment and the combined adhesive-oxidative mechanism of specimens' wear. The addition of 10 wt.% aluminum filament to bronze in the additive manufacturing process is an effective means for increasing the resistance of the material to electrochemical corrosion and increasing its wear resistance.

For citation: Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Kolubaev E.A., Tarasov S.Yu. Study of the properties of silicon bronze-based alloys printed using electron beam additive manufacturing technology. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 110–130. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-110-130. (In Russian).

References

1. Schütze M., Feser R., Bender R. *Corrosion resistance of copper and copper alloys*. Wiley, 2011. 752 p.
2. Horn T.J., Gamzina D. Additive manufacturing of copper and copper alloys. *Additive Manufacturing Processes*. ASM International, 2020, pp. 388–418. DOI: 10.31399/asm.hb.v24.a0006579.

*** Corresponding author**
Filippov Andrey V., Ph.D. (Engineering), Head of Laboratory
Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS
2/4, pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: 8 (999) 178-13-40, **e-mail:** avf@ispms.ru

3. Adler L., Fu Z., Koerner C. Electron beam based additive manufacturing of Fe3Al based iron aluminides – processing window, microstructure and properties. *Materials Science and Engineering A*, 2020, vol. 785, p. 139369. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139369.

4. Ledford C., Rock C., Tung M., Wang H., Schroth J., Horn T. Evaluation of electron beam powder bed fusion additive manufacturing of high purity copper for overhang structures using in-situ real time backscatter electron monitoring. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 48, pp. 828–838. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.120.

5. Chumaevskii A.V., Kolubaev E.A., Osipovich K.S., GurIanov D.A., Rubtsov V.E., Nikonov S.Y., Boltrushevich A.E. Obtaining of bimetallic product from nickel superalloy and heat-resistant bronze by wire-feed electron beam additive manufacturing. *Russian Physics Journal*, 2022, vol. 65, pp. 1231–1238. DOI: 10.1007/s11182-022-02756-5.

6. Fu Z., Ye J., Franke M., Körner C. A novel approach for powder bed-based additive manufacturing of compositionally graded composites. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 56, p. 102916. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102916.

7. Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Savchenko N.L., Moskvichev E.N., Utyaganova V.R., Kolubaev E.A., Smolin A.Y., Tarasov S.Y. Characterization of gradient CuAl–B4C composites additively manufactured using a combination of wire-feed and powder-bed electron beam deposition methods. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 859, p. 157824. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824.

8. Zykova A., Chumaevskii A., Panfilov A., Vorontsov A., Nikolaeva A., Osipovich K., Gusarova A., Chebodaeva V., Nikonov S., Gurianov D., Filippov A., Dobrovolsky A., Kolubaev E., Tarasov S. Aluminum Bronze/Udimet 500 composites prepared by electron-beam additive double-wire-feed manufacturing. *Materials (Basel)*, 2022, vol. 15, p. 6270. DOI: 10.3390/ma15186270.

9. Gotterbarm M.R., Seifi M., Melzer D., Džugan J., Salem A.A., Liu Z.H., Körner C. Small scale testing of IN718 single crystals manufactured by EB-PBF. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, p. 101449. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101449.

10. Bäreis J., Semjatov N., Renner J., Ye J., Zongwen F., Körner C. Electron-optical in-situ crack monitoring during electron beam powder bed fusion of the Ni-base superalloy CMSX-4. *Progress in Additive Manufacturing*, 2022. DOI: 10.1007/s40964-022-00357-9.

11. Fortuna S., Gurianov D., Nikonov S., Ivanov K., Mironov Y., Vorontsov A. Features of the macro-, micro-, and fine structure of the nickel superalloy product material formed by the method of electron beam additive manufacturing. *Materials*, 2022, vol. 15, p. 8882. DOI: 10.3390/ma15248882.

12. Gurianov D., Fortuna S., Nikonov S., Kalashnikova T., Chumaevskii A., Utyaganova V., Kolubaev E., Rubtsov V. Assessment of structure and properties homogeneity after repairing of a nickel-based superalloy product by the electron beam additive technology. *Crystals*, 2022, vol. 12, p. 1400. DOI: 10.3390/cryst12101400.

13. Bieske J., Franke M., Schloffer M., Körner C. Microstructure and properties of TiAl processed via an electron beam powder bed fusion capsule technology. *Intermetallics*, 2020, vol. 126, p. 106929. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106929.

14. Knörlein J., Franke M.M., Schloffer M., Körner C. In-situ aluminum control for titanium aluminide via electron beam powder bed fusion to realize a dual microstructure. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 59, p. 103132. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103132.

15. Reith M., Breuning C., Franke M., Körner C. Impact of the power-dependent beam diameter during electron beam additive manufacturing: a case study with γ-TiAl. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, p. 11300. DOI: 10.3390/app122111300.

16. Yang J., Fu Z., Ye J., Kübrich D., Körner C. Electron beam-based additive manufacturing of Fe93.5Si6.5 (Wt.%) soft magnetic material with controllable magnetic performance. *Scripta Materialia*, 2022, vol. 210, p. 114460. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2021.114460.

17. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*, 2021, vol. 172, p. 110867. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110867.

18. Utyaganova V.R., Filippov A.V., Shamarin N.N., Vorontsov A.V., Savchenko N.L., Fortuna S.V., Gurianov D.A., Chumaevskii A.V., Rubtsov V.E., Tarasov S.Yu. Controlling the porosity using exponential decay heat input regimes during electron beam wire-feed additive manufacturing of Al-Mg alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 2823–2838. DOI: 10.1007/s00170-020-05539-9.

19. Zhang X., Shi H., Wang X., Zhang S., Luan P., Hu X., Xu C. Processing, microstructure, and mechanical behavior of AZ31 magnesium alloy fabricated by electron beam additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 938, p. 168567. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.168567.

20. Wolf T., Fu Z., Körner C. Selective electron beam melting of an aluminum bronze: microstructure and mechanical properties. *Materials Letters*, 2019, vol. 238, pp. 241–244. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.12.015.

21. Zykova A.P., Panfilov A.O., Chumaevskii A.V., Vorontsov A.V., Nikonov S.Yu., Moskvichev E.N., Gurianov D.A., Savchenko N.L., Tarasov S.Yu., Kolubaev E.A. Formation of microstructure and mechanical characteristics in electron beam additive manufacturing of aluminum bronze with an in-situ adjustment of the heat input. *Russian Physics Journal*, 2022, vol. 65, iss. 5, pp. 811–817. DOI: 10.1007/s11182-022-02701-6.

22. Filippov A., Shamarin N., Moskvichev E., Savchenko N., Kolubaev E., Khoroshko E., Tarasov S. The effect of heat input, annealing, and deformation treatment on structure and mechanical properties of electron beam additive manufactured (EBAM) silicon bronze. *Materials*, 2022, vol. 15, p. 3209. DOI: 10.3390/ma15093209.

23. Khoroshko E.S., Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N., Utyaganova V.R., Tarasov S.Yu., Savchenko N.L., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Lychagin D.V. Structure and mechanical properties of Cu–Al–Si–Mn system-based copper alloy obtained by additive manufacturing. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64, pp. 333–339. DOI: 10.1007/s11182-021-02333-2.

24. Casting of copper and copper alloys. *ASM Handbook*. Vol. 15. ASM International, 2008, pp. 1026–1048.

25. Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J.J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. *Progress in Materials Science*, 2014, vol. 60, pp. 130–207. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.09.002.

26. Ponweiser N., Richter K.W. New investigation of phase equilibria in the system Al–Cu–Si. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 512, pp. 252–263. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.09.076.

27. Iqbal J., Ahmed F., Hasan F. Development of microstructure in silicon-aluminum-bronze. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008, vol. 3, pp. 47–53.

28. Miettinen J. Thermodynamic description of the Cu–Al–Si system in the copper-rich corner. *Calphad*, 2007, vol. 31, pp. 449–456. DOI: 10.1016/j.calphad.2007.05.001.

29. Hisatsune C. Constitution diagram of the copper–silicon–aluminium system. *Memoirs of the College of Engineering, Kyoto Imperial University*, 1935, vol. 9, pp. 18–47.

30. Wilson F.H. The copper-rich corner of the copper-aluminum-silicon diagram. *Metals Technology*, 1948, vol. 15, pp. 1–12.

31. Hallstedt B., Gröbner J., Hampl M., Schmid-Fetzer R. Calorimetric measurements and assessment of the binary Cu–Si and ternary Al–Cu–Si phase diagrams. *Calphad*, 2016, vol. 53, pp. 25–38.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 1 с. 131–148
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Влияние продолжительности боромеднения на толщину диффузионного слоя и микротвердость углеродистых и легированных сталей

Степан Лысых [1, a, *], *Василий Корнопольцев* [2, b], *Ундрах Мишигдоржийн* [1, c], *Юрий Хараев* [3, d], *Александр Тихонов* [4, e], *Владимир Иванцивский* [5, f], *Никита Вахрушев* [5, g]

[1] Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия
[2] Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия
[3] Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40В, г. Улан-Удэ, 670013, Россия
[4] Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, г. Иркутск, 664074, Россия
[5] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-1421-5251, lysyh.stepa@yandex.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-1970-2945, kompo@mail.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-7863-9045, undrakh@ipms.bscnet.ru, [d] https://orcid.org/0000-0001-6449-4175, kharaev@inbox.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-4917-9916, tihonovalex90@mail.ru, [f] https://orcid.org/0000-0001-9244-225X, ivancivskij@corp.nstu.ru,
[g] https://orcid.org/0000-0002-2273-5329, vah_nikit@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.1; 66.040

История статьи:
Поступила: 15 декабря 2022
Рецензирование: 09 января 2023
Принята к печати: 03 февраля 2023
Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:
Химико-термическая обработка (ХТО)
Боромеднение
Диффузионный слой
Углеродистая сталь
Легированная сталь
Микротвердость
Шероховатость

Финансирование:
Исследование углеродистых сталей 45 и У10 выполнено в рамках государственного задания БИП СО РАН № 0273-2021-0007. Исследование легированной стали 5ХНМ выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034) и ЦКП «Научные приборы» Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова. Авторы выражают благодарность Улаханову Николаю Сергеевичу и Гуляшинову Павлу Анатольевичу за помощь в координации экспериментальных исследований.

АННОТАЦИЯ

Введение. Боромеднение – один из способов химико-термической обработки (ХТО), направленный на получение диффузионных слоев с высокими физико-механическими свойствами на поверхности углеродистых и легированных сталей. Толщина диффузионного слоя является наиболее важной характеристикой ХТО, которая определяет глубину упрочнения. Следовательно, интенсивность и основные характеристики процесса ХТО (толщина слоя, распределение концентрации легирующего элемента) будут зависеть от условий проведения процесса (температуры, времени выдержки и количества легирующего элемента). **Целью настоящей работы** является определение температурно-временных параметров диффузионного боромеднения, способствующих получению диффузионных слоев с максимальной толщиной. **В работе рассмотрены** результаты исследований по упрочнению углеродистых и легированных сталей (на примере стали 45, У10 и 5ХНМ) нагревом в порошковых насыщающих смесях, содержащих бор и медь. Процесс боромеднения проводили в герметичных контейнерах с порошковой насыщающей смесью, состоящей из карбида бора, оксида меди и фторида натрия в качестве активатора при температуре 950 °С, в течение 3…5 ч. Полученные образцы с диффузионным слоем исследовали на оптическом и растровом электронном микроскопе (РЭМ); определены микротвердость, элементный и фазовый состав слоев, а также шероховатость полученных поверхностей. **Результаты и обсуждения.** Исследована микроструктура полученных диффузионных слоев, показаны диаграммы изменения толщины слоев и распределения микротвердости по глубине диффузионных слоев. Установлено, что при увеличении времени выдержки с 3 до 5 часов толщина диффузионного слоя возрастает от 120 до 170 мкм на стали 45; от 110 до 155 мкм на стали У10 и от 130 до 230 мкм на стали 5ХНМ. Выявлено постепенное снижение концентрации бора и меди по толщине слоя с 15…16 % и 2…3 % на поверхности соответственно до нулевых значений на границе с основным металлом. Установлено, что процесс боромеднения приводит к созданию более протяженных по глубине боридных слоев на поверхности углеродистых и легированных сталей по сравнению с чистым борированием. Причем увеличение продолжительности выдержки при проведении процесса способствует наибольшему увеличению толщины слоя на стали 5ХНМ. Проведено исследование микрогеометрии, показаны микротопографии и профилограммы поверхностей образцов до и после боромеднения. Установлено, что шероховатость после боромеднения увеличивается в 2-3 раза по сравнению с исходной, а увеличение продолжительности процесса при этом не оказывает существенного влияния на шероховатость.

Для цитирования: Влияние продолжительности боромеднения на толщину диффузионного слоя и микротвердость углеродистых и легированных сталей / С.А. Лысых, В.Н. Корнопольцев, У.Л. Мишигдоржийн, Ю.П. Хараев, А.Г. Тихонов, В.В. Иванцивский, Н.В. Вахрушев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 131–148. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148.

***Адрес для переписки**
Лысых Степан Алексеевич, м.н.с.
Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Сахьяновой 6,
670047, г. Улан-Удэ, Россия
Тел.: 8-924-397-24-76, **e-mail:** lysyh.stepa@yandex.ru.

Введение

Задачи повышения надежности, работоспособности и долговечности деталей машин, конструкций и инструмента относятся к числу первоочередных задач в науке и технике. Для решения этих задач требуется разработка и внедрение эффективных методов, которые позволяют повысить многие эксплуатационные характеристики (коррозионную стойкость и износостойкость) путем поверхностного упрочнения.

Одним из распространенных методов поверхностного упрочнения является химико-термическая обработка (ХТО), которая направлена на повышение широкого спектра физико-механических свойств при эксплуатации деталей машин и инструмента. Сущность любого метода ХТО заключается в термическом и химическом воздействии на материал с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя.

Из анализа литературных данных следует, что одним из самых распространенных методов ХТО является борирование [1–6]. Процесс борирования известен более полувека, но применяется не так широко по сравнению с цементацией [7–10], азотированием и нитроцементацией [11–14]. В результате насыщения железоуглеродистых сплавов бором на поверхности формируются слои, обладающие высокой твердостью (1600…2000 HV). Сдерживающим фактором широкого распространения борирования в машиностроении является высокая хрупкость и склонность к трещинообразованию поверхностных слоев после различных химико-термических способов обработки [15–17]. Существует несколько способов снижения хрупкости боридного слоя:

1) получение однофазных слоев, которые состоят из фазы Fe_2B;

2) получение более тонких слоев;

3) использование в составе насыщающей смеси совместно с бором таких элементов, как хром, медь, никель, алюминий и др. [21–24].

Особый интерес представляет один из методов ХТО – боромеднение. Данный метод направлен на увеличение толщины диффузионного слоя, а также на повышение пластичности диффузионного слоя. Авторами работ [21–23] установлено, что увеличение концентрации меди в составе насыщающей смеси способствует увеличению толщины диффузионного слоя.

Целью данной работы является исследование строения диффузионного слоя в зависимости от времени проведения комплексного насыщения поверхности образцов из стали 45, У10 и 5ХНМ бором и медью.

Методика исследований

Процесс диффузионного насыщения проводился в порошковой среде. В качестве исследуемых образцов использовались стали 45, У10 и 5ХНМ, химический состав которых представлен в табл. 1.

Насыщающая смесь включала в себя порошок карбида бора, алюминия и оксида меди. Фтористый натрий выступал активатором процесса насыщения.

Состав насыщающей смеси имел следующее процентное содержание компонентов: 47 % B_4C + + 28 % CuO + 23 % Al + 2 % NaF. Оптимальное

Таблица 1

Table 1

Химический состав стали 45, У10 и 5ХНМ, масс. %

Chemical composition of Steel 45 (0.45% C), Steel U10 (1.0% C), and 0.5C-Cr-Ni-Mn steel, wt. %

Марка стали / Steel grade	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe	Mo
Сталь 45	0,42…0,5	0,17…0,37	0,5…0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,25	~97	–
Сталь У10	0,96…1,03	0,17…0,33	0,17…0,33	до 0,25	до 0,028	до 0,03	до 0,2	до 0,25	~97	–
Сталь 5ХНМ	0,5…0,6	0,1…0,4	0,5…0,8	1,4…1,8	до 0,03	до 0,03	0,5…0,8	до 0,3	~95	0,15…0,3

количество оксида меди было выбрано исходя из работ [21–23], где были получены диффузионные слои с максимальной толщиной.

Подготовленные образцы помещали в контейнер, засыпали насыщающей смесью (рис. 1, *а*) и убирали в муфельную печь (рис. 1, *б*). Для предотвращения окислительных процессов, крышку контейнера герметизировали легкоплавким стеклом. Диффузионное насыщение проводилось при температуре 950 ºС, в течение 3, 4 и 5 часов. Далее контейнер охлаждался на воздухе, образцы извлекались из него, очищались от остатков насыщающей смеси. Затем следовала подготовка образцов к металлографическим исследованиям.

Образцы закрепляли в струбцины, затем проводилось шлифование и полирование. Для выявления микроструктуры исследуемых образцов использовался химически активный раствор, состоящий из азотной кислоты (4 %) и спирта (остальное). Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 2С, измерения микротвердости – на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка на алмазную пирамидку составляла 50 г. Элементный анализ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JCM-6000 с элементным дисперсионным анализатором. Для изучения структуры протравленную поверхность образцов изучали в режиме вторичных электронов. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре D2 PHASER с линейным детектором LYNXEYE. Шаг измерения равнялся 0,02°, время обработки одного шага составляло 1,2 с. Исследование топографии с определением параметров шероховатости поверхностей полученных образцов осуществляли на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 с программным обеспечением Vision64 [24, 25].

а *б*

Рис. 1. Упакованные контейнеры (*а*), муфельная печь ЭКПС-50 (*б*)

Fig. 1. Packed containers (*a*), muffle furnace *EKPS-50* (*б*)

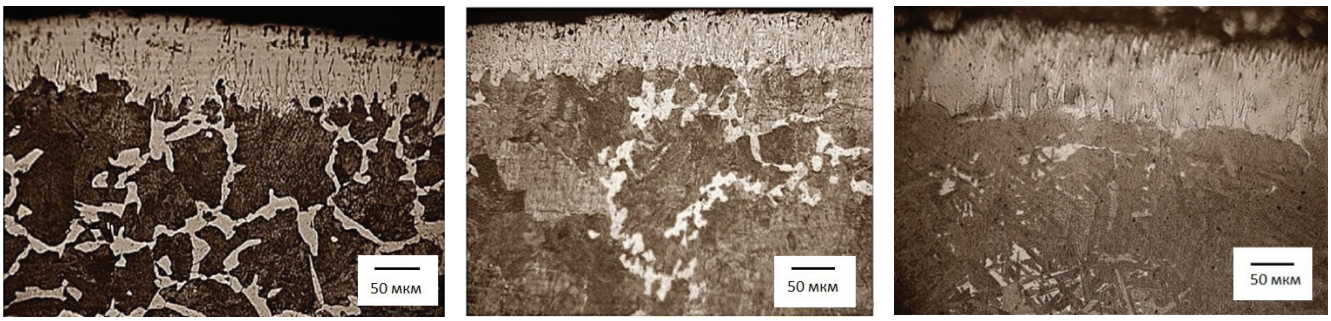
Результаты и их обсуждение

В результате диффузионного поверхностного насыщения образцов бором и медью в течение часов были получены диффузионные слои толщиной от 110 до 130 мкм (рис. 2).

После проведения диффузионного боромеднения в течение 4 часов на поверхности образцов были получены диффузионные слои толщиной 140…220 мкм (рис. 3).

На рис. 2, *а* показан диффузионный слой стали 45 толщиной 120 мкм с твердостью 1800…1600 HV. Диффузионный слой имеет «классическое» для боридного слоя строение в виде игл. Характерной особенностью является глубокое внедрение игл в основу стали. Многие авторы считают, что это является причиной прочного сцепления диффузионного слоя с основой металла [26–29]. При этом иглы на концах имеют скругления. Наблюдается выделение карбоборидной фазы непосредственно от боридных игл, твердость которых составила 1200…1750 HV. Переходная зона между слоем и основой стали не отличается от ферритно-перлитной структуры основы.

После проведения боромеднения стали 45 в течение 4 часов толщина слоя составила 140 мкм, что на 20 мкм больше по сравнению с



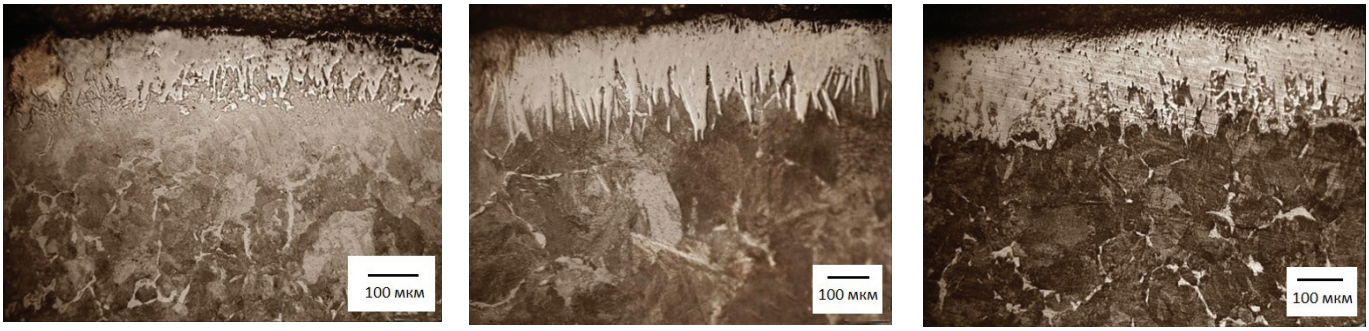
а *б* *в*

Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного поверхностного насыщения бором и медью в течение 3 часов выдержки:

а – сталь 45, толщина слоя 120 мкм; *б* – сталь У10, толщина слоя 110 мкм; *в* – сталь 5ХНМ, толщина слоя 130 мкм

Fig. 2. Microstructure of the diffusion layer after complex surface saturation with boron and copper for 3 hours of soaking:

а – Steel 45 (0.45 % C), layer thickness is 120 μm; *б* – Steel U10 (1.0 % C), layer thickness is 110 μm; *в* – 0.5 C-Cr-Ni-Mn steel, layer thickness is 130 μm



а *б* *в*

Рис. 3. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного поверхностного насыщения бором и медью в течение 4 часов выдержки:

а – сталь 45, толщина слоя 160 мкм; *б* – сталь У10, толщина слоя 140 мкм; *в* – сталь 5ХНМ, толщина слоя 220 мкм

Fig. 3. Microstructure of the diffusion layer after complex surface saturation with boron and copper for 4 hours of soaking:

а – Steel 45 (0.45 % C), layer thickness is 160 μm; *б* – Steel U10 (1.0 % C), layer thickness is 140 μm; *в* – 0.5C-Cr-Ni-Mn steel, layer thickness is 220 μm

выдержкой в 3 часа (рис. 3, *а*). Микротвердость составила 2000 HV на поверхности с последующим снижением до 1600 HV на границе раздела слой–основание. Наблюдается срастание игл у основания с образованием сплошного слоя. Отсутствует примыкающая к боридным иглам карбоборидная фаза. Переходная зона представлена более явно в виде светлой ферритной прослойки, где максимальная концентрация бора достигает 4 %, далее она постепенно снижается по направлению к сердцевине образца. Структура стали сохраняет избыточный феррит (светлые включения), наблюдается также мартенсит с небольшим содержанием остаточного аустенита.

На поверхности инструментальной углеродистой стали У10 после 3 часов ХТО получен диффузионный слой толщиной 110 мкм, твердость которого составила 1975…1575 HV (рис. 2, *б*). Слой состоит из плотно прижатых друг к другу игл с невыраженной переходной зоной, которая представляет собой перлит с малым содержанием бора. Структура стали состоит из пластинчатого перлита, окруженного тонкой цементитной сеткой. Необходимо отметить наличие светлых скоагулированных включений, по-видимому, являющихся аустенитом.

После боромеднения стали У10 в течение 4 часов получен диффузионный слой толщиной

140 мкм, что на 30 мкм больше по сравнению с выдержкой данной стали в течение 3 часов (рис. 3, *б*). Увеличилась незначительно и микротвердость до 2050 HV на поверхности слоя с последующим снижением до 1600 HV на границе с основным металлом. Микроструктура свидетельствует о срастании игл и получении сплошного слоя в верхней и средней части слоя с сохранением игольчатой структуры на границе с основой. Наличие переходной зоны не наблюдается, а микроструктура основы представлена пластинчатым перлитом с цементитной сеткой.

Металлографические исследования структуры и диффузионного слоя стали 5ХНМ показали наличие диффузионного слоя толщиной 130 и 220 мкм при 3- и 4-часовом боромеднении соответственно (рис. 2, *б* и 3, *б*). Микротвердость составила 1800…1500 HV при 3-часовой выдержке и 2000…1650 HV при выдержке в течение 4 часов.

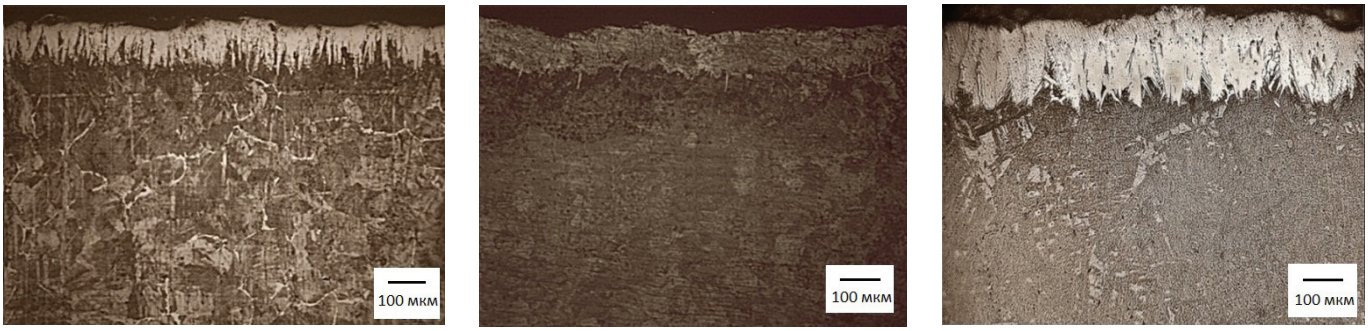
При проведении диффузионного насыщения бором и медью образцов из сталей 45, У10 и 5ХНМ в течение 5 часов наблюдается увеличение толщины диффузионного слоя на 10…15 мкм (рис. 5). На рис. 4, *а* изображена структура стали 45, где в отличие от предыдущих режимов боромеднения слой имеет ярко выраженное игольчатое строение в виде укрупненных игл с прямолинейным направлением к сердцевине образца. Отмечается увеличение микротвердости в приповерхностной части слоя, где ее максимальное значение равно 2100 HV (рис. 6, *а*).

На поверхности образцов из стали У10 после 5-часового боромеднения диффузионный слой теряет игольчатое строение и приобретает вид сплошного слоя, о чем свидетельствует рис. 4, *б*. Прирост толщины составил 15 мкм, а максимальное значение микротвердости было равно 2000 HV (рис. 6, *б*).

Незначительные изменения структуры диффузионного слоя после 5-часового боромеднения претерпевают образцы из стали 5ХНМ (рис. 4, *в*). Толщина слоя была увеличена на 10 мкм (рис. 5). Игольчатое строение слоя остается неизменным, но наблюдается укрупнение игл. Стоит также отметить, что непосредственно к боридным иглам примыкают некоторые выделения, предположительно карбоборидного строения, которые имеют направление под некоторым углом относительно самих игл. Микротвердость и характер ее распределения остаются без изменений (рис. 6, *в*).

Увеличение содержания углерода в сталях 45 и У10 снижает среднюю толщину слоя при обоих выдержках. На стали 5ХНМ толщина слоя наибольшая, несмотря на промежуточное содержание углерода (рис. 4). Вероятно, легирующие элементы в стали играют роль в интенсификации диффузии при боромеднении.

На рис. 6 видно, что распределение микротвердости после боромеднения в течение 3, 4 и



а *б* *в*

Рис. 4. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного поверхностного насыщения бором и медью в течение 5 часов выдержки:

а – сталь 45, толщина слоя 170 мкм; *б* – сталь У10, толщина слоя 155 мкм; *в* – сталь 5ХНМ, толщина слоя 230 мкм

Fig. 4. Microstructure of the diffusion layer after complex surface saturation with boron and copper for 5 hours of exposure:

a – Steel 45 (0.45 % C), layer thickness is 170 μm; *б* – Steel U10 (1.0 % C), layer thickness is 155 μm; *в* – 0.5C-Cr-Ni-Mn steel, layer thickness is 230 μm

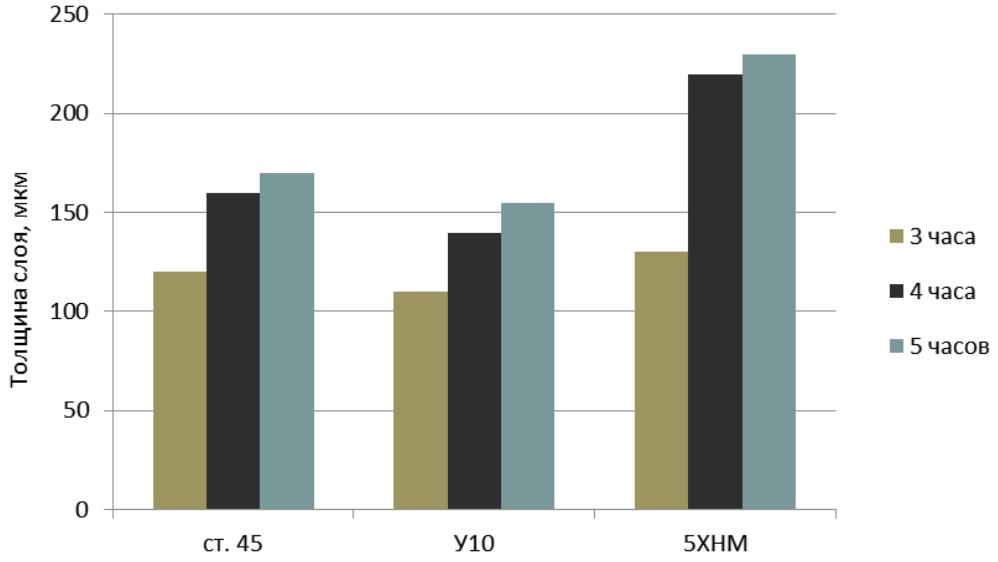


Рис. 5. Толщина диффузионного слоя, полученного в результате боромеднения образцов из стали 45, У10, 5ХНМ в течение 3, 4 и 5 часов

Fig. 5. The thickness of the diffusion layer formed after borocoppering of Steel 45 (0.45 % C), Steel U10 (1.0 % C), and 0.5C-Cr-Ni-Mn steel for 3, 4 and 5 hours

5 часов на всех сталях схожее и характеризуется плавным снижением значений от поверхности к основному металлу. Необходимо отметить, что микротвердость всех образцов по всей толщине слоя после 5-часового боромеднения выше на 100…150 HV по сравнению с микротвердостью образцов после боромеднения в течение 3 и 4 часов. Предположительно, что это связано с ростом содержания более твердой фазы FeB после 5-часового боромеднения.

Данные, приведенные в табл. 2 и на рис. 7, *а*, подтверждают наличие бора и меди в диффузионном слое на исследуемом образце из стали 45. Наблюдается уменьшение концентрации бора и меди по направлению от поверхности к границе раздела с основой. Углерод оттесняется в переходную зону, где его концентрация максимальна и составляет 0,56 %. Никель и марганец практически равномерно распределены по всей толщине диффузионного слоя. Наличие хрома обнаружено в переходной зоне. Следовательно, элементный анализ показывает характер распределения легирующих элементов, соответствующих химическому составу стали 45.

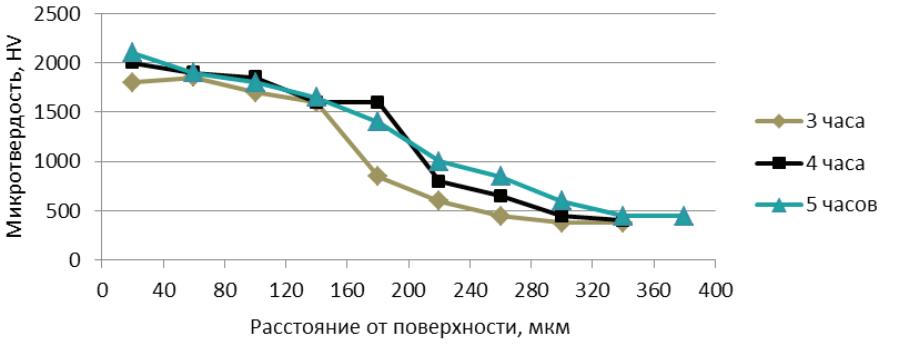
Результаты, представленные в табл. 3 и на рис. 7, *б* для стали У10, указывают на наличие бора на поверхности в количестве 16,81 % и постепенное снижение его концентрации до 0,68 %. Максимальное количество меди наблюдается на поверхности диффузионного слоя и непосредственно под боридными иглами. Углерод оттесняется под боридный слой, где его содержание достигает 1,69 %. Хром и марганец равномерно распределены по всей толщине диффузионного слоя.

В табл. 4 представлен элементный состав стали 5ХНМ после боромеднения в течение 4 часов (рис. 7, *в*). Как и на предыдущих образцах, максимальная концентрация бора наблюдается на поверхности с последующим ее снижением по направлению к границе с основой. Максимальная концентрация углерода видна на поверхности и в переходной зоне. Алюминий, хром, никель, молибден и медь сконцентрированы в тех же зонах, что и углерод.

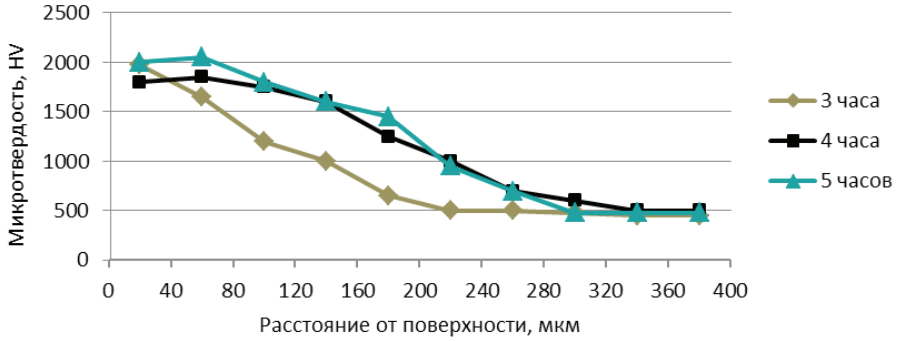
Рентгенофазовый анализ, проведенный на поверхности стали 45 (рис. 8) после боромеднения, демонстрирует наличие фаз FeB, Fe_2B. Невозможность определения меди, вероятнее всего, связана с ее малым количеством.

Рентгенограмма, полученная на стали У10 (рис. 9), демонстрирует наличие фазы Fe_2B и карбидной фазы Fe_3C. Стоит обратить внимание на отсутствие фазы FeB. Присутствие меди также не наблюдается.

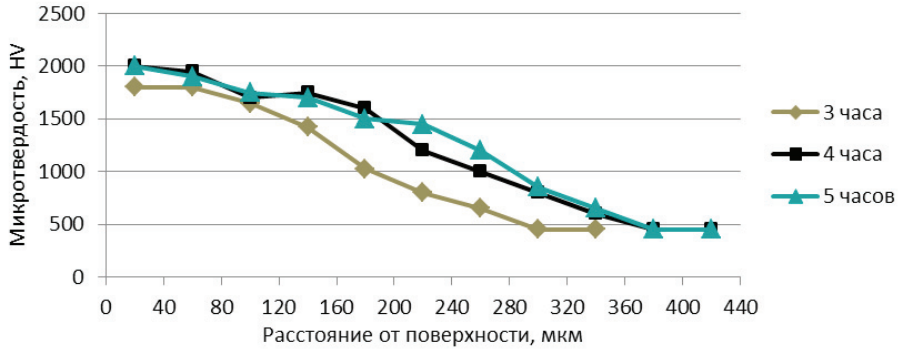
В результате проведения рентгенофазового анализа образца из стали 5ХНМ (рис. 10) был установлен фазовый состав боридного слоя,



а



б



в

г

Рис. 6. Распределение микротвердости:

а – для стали 45; *б* – для стали У10; *в* – для стали 5ХНМ; *г* – микроструктура стали 45 после 4 часов выдержки с отпечатками измерения микротвердости

Fig. 6. Microhardness distribution:

а – for Steel 45 (0.45 % C); *б* – for Steel U10 (1.0 % C); *в* – for 0.5C-Cr-Ni-Mn steel; *г* – microstructure of Steel 45 (0.45 % C) after 4 hours of soaking with points of indentation

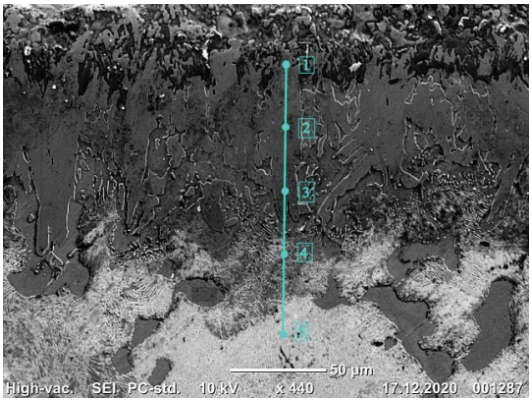
Таблица 2

Table 2

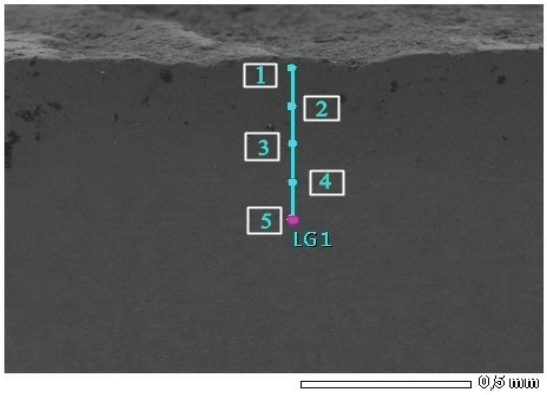
Элементный состав диффузионного слоя на стали 45 после 4-часового боромеднения (рис. 7, *а*)

The elemental composition of the diffusion layer on Steel 45 (0.45% C) after 4 hours of borocoppering (fig. 7, *a*)

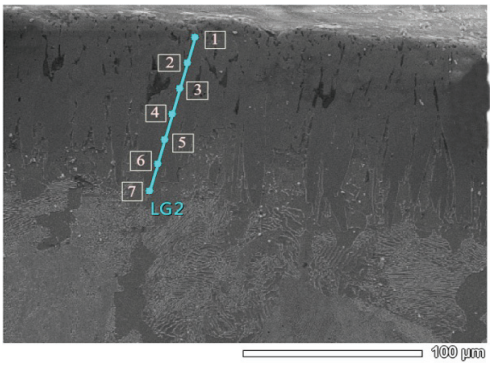
Точки спектра / Points of the spectrum	Химические элементы, масс.% / Chemical elements, mass%						
	B	C	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe
1	16,73	0,2	0,29	0,41	–	2,39	79,98
2	11,37	0,06	0,38	0,44	–	–	87,75
3	6,2	0,32	0,22	0,51	–	–	92,75
4	–	0,56	0,24	0,31	–	0,36	98,53
5	–	0,47	0,35	0,51	0,12	0,17	98,38



а



б



в

Рис. 7. Точки набора спектров в диффузионном слое на образце в процессе элементного анализа: *а* – сталь 45; *б* – сталь У10; *в* – сталь 5ХНМ после 4-часового боромеднения

Fig. 7. The points of the spectra counting in the diffusion layer on the sample during elemental analysis: *а* – Steel 45 (0.45 % C); *б* – Steel U10 (1.0 % C); *в* – 0.5C-Cr-Ni-Mn steel after 4 hours of borocoppering

который состоит из трех боридов: FeB, Fe_2B и Cr_5B_3. Необходимо отметить, что медь выявлена в свободном виде, что подтверждает предположения, указанные в работе [21], где она не образует термически устойчивых соединений с бором, железом и углеродом.

В результате исследования микрогеометрии были получены трехмерные микротопографии, а также профилограммы поверхностей образцов после ХТО (рис. 11–13). Оценка шероховатости производилась по параметру *Ra* (см. табл. 5).

Таблица 3

Table3

Элементный состав диффузионного слоя на стали У10 после 4-часового боромеднения (рис. 7, *б*)

The elemental composition of the diffusion layer on Steel U10 (1.0% C) after 4 hours of borocoppering (fig. 7, *б*)

Точки спектра / Points of the spectrum	Химические элементы, масс.% / Chemical elements, mass %								
	B	C	Al	Si	Cr	Mn	Ni	Fe	Cu
1	14,81	0,83	0,22	0,16	0,34	0,57	–	81,18	1,89
2	12,73	0,43	0,19	0,17	0,15	0,08	–	85,68	0,57
3	6,91	0,61	0,06	0,11	0,09	0,55	–	83,34	–
4	0,68	1,22	–	0,34	0,23	0,32	0,11	95,91	1,19
5	–	1,69	–	0,28	0,12	0,3	–	97,61	–

Таблица 4

Table4

Элементный состав диффузионного слоя на стали 5ХНМ после 4-часового боромеднения (рис. 7, *в*)

The elemental composition of the diffusion layer on 0.5C-Cr-Ni-Mn steel after 4 hours of borocoppering (fig. 7, *в*)

Точки спектра / Points of the spectrum	Химические элементы, масс.% / Chemical elements, mass.%							
	B	C	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
1	16,43	0,35	0,3	0,66	0,67	2,6	0,57	78,42
2	14,77	0,15	0,51	0,66	0,67	–	0,14	83,1
3	12,05	0,06	–	0,53	0,51	0,51	0,27	86,07
4	5,98	0,03	–	0,62	0,31	–	0,34	92,72
5	1,35	0,41	–	0,63	0,46	–	0,25	96,9
6	0,21	0,37	0,56	0,59	0,57	0,09	0,07	97,54
7	–	0,4	0,58	0,4	0,56	0,54	–	97,52

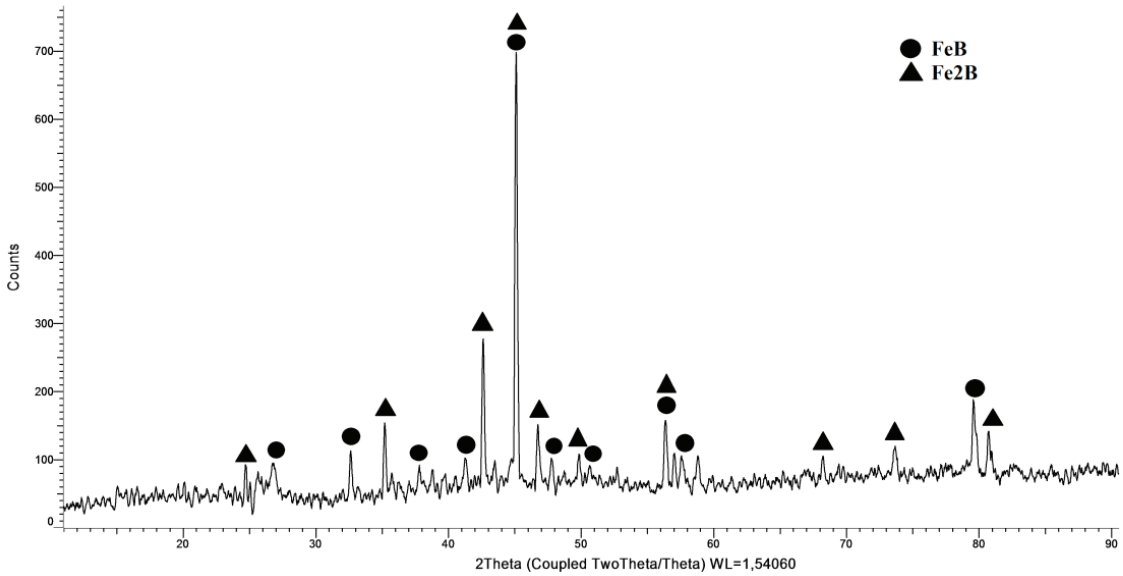


Рис. 8. Рентгенограмма образца из стали 45 после боромеднения в течение 4 часов

Fig. 8. XRD pattern of the specimen of Steel 45 (0.45 % C) after borocoppering for 4 hours

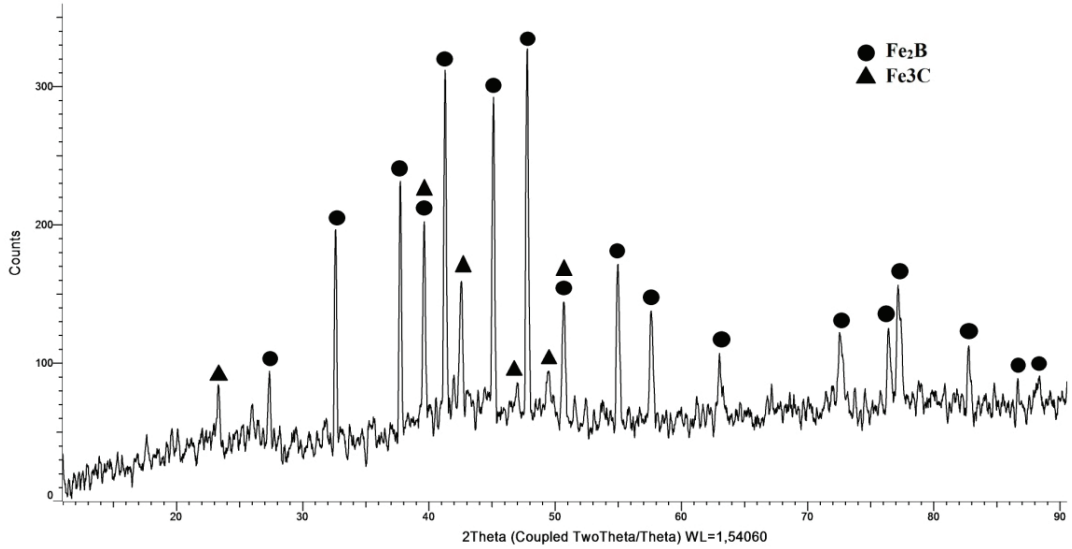


Рис. 9. Рентгенограмма образца из стали У10 после боромеднения в течение 4 часов

Fig. 9. XRD pattern of the specimen of Steel U10 (1.0 % C) after borocoppering for 4 hours

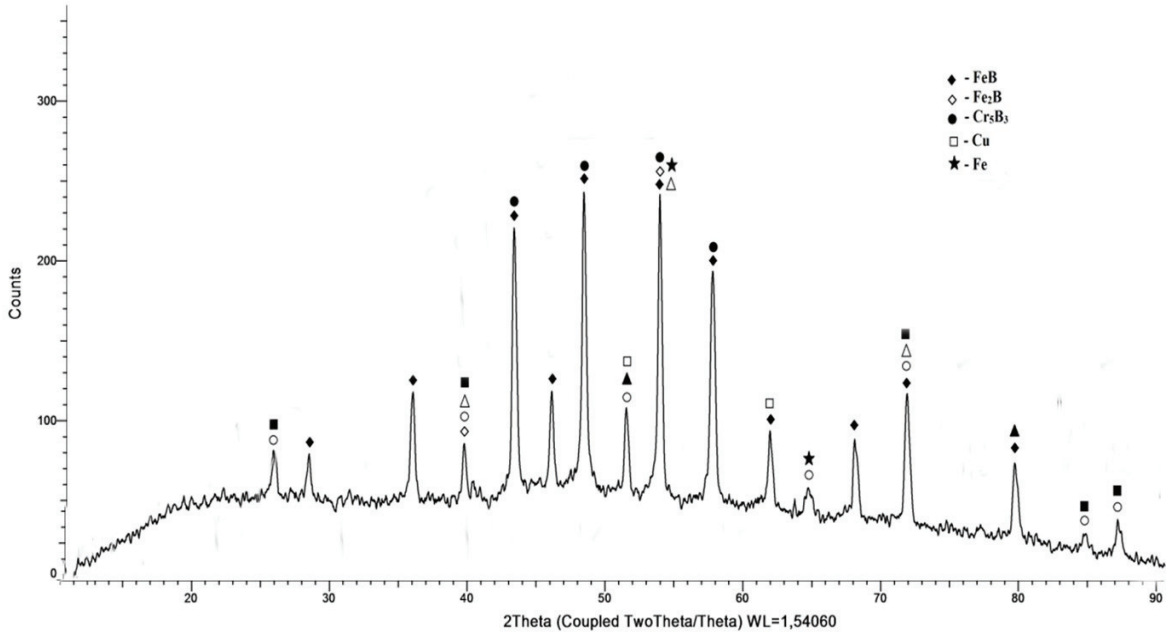
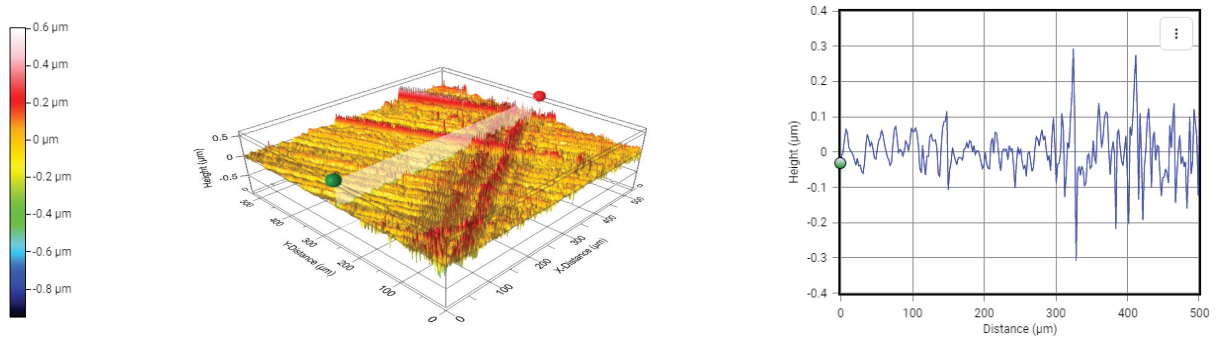


Рис. 10. Рентгенограмма образца из стали 5ХНМ после боромеднения в течение 4 часов

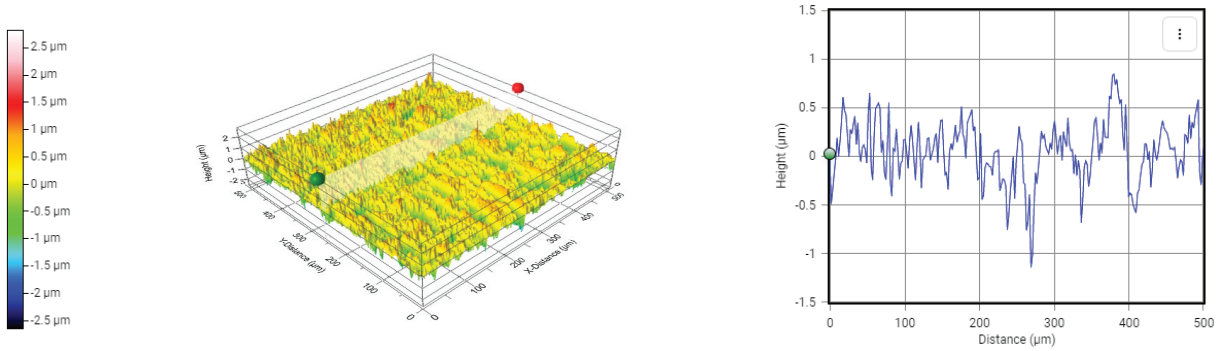
Fig. 10. XRD pattern of the specimen made of 0.5C-Cr-Ni-Mn steel after borocoppering for 4 hours

Шероховатость сталей 45, У10 и 5ХНМ в исходном состоянии до проведения ХТО была сопоставима, и значения *Ra* находятся в пределах 0,06…0,084 мкм (рис. 11, *а*, 12, *а*, 13, *а*). После ХТО наблюдается рост высот микронеровностей по сравнению с исходными образцами для всех рассматриваемых материалов и времени обработки (рис. 11, *б–г*, 12, *б–г*, 13, *б–г*). После боромеднения установлен рост параметра *Ra* в 2-3 раза по сравнению с исходными образцами до обработки, при этом увеличение времени ХТО с 3 до 5 часов не приводит к дальнейшему увеличению шероховатости (см. табл. 5).

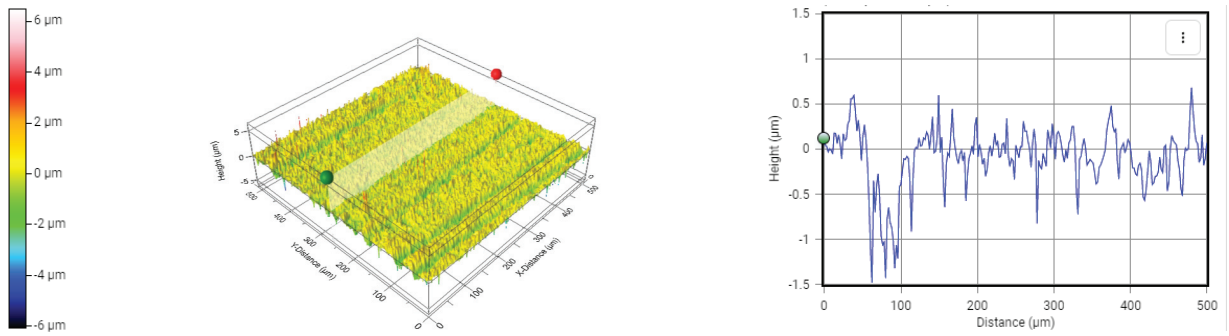
Полученная шероховатость после боромеднения (*Ra* 0,16…0,2 мкм) при исходной *Ra* 0,06…0,08 мкм удовлетворяет требованиям к шероховатости поверхностей большинства изделий машиностроения и не требует дополнительной последующей механической обработки.



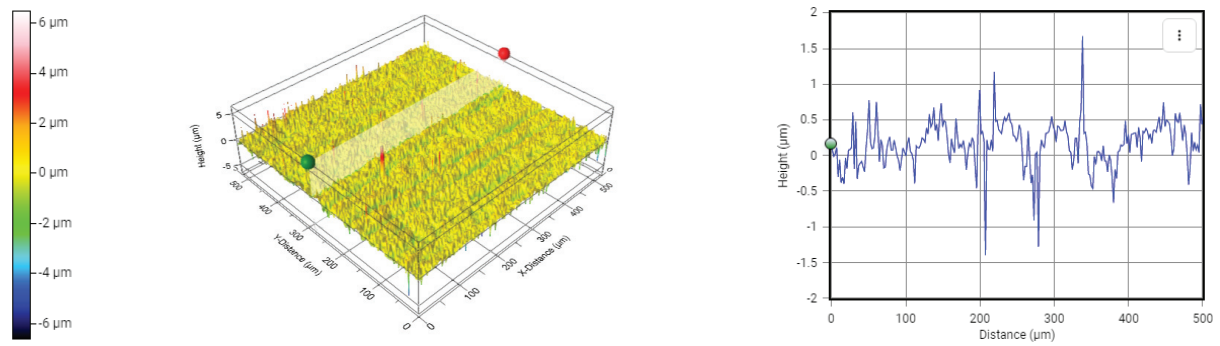
а



б



в



г

Рис. 11. Микротопография поверхности образцов из стали 45:

а – исходного, без обработки; *б* – после боромеднения в течение 3 часов; *в* – после боромеднения в течение 4 часов; *г* – после боромеднения в течение 5 часов

Fig. 11. Microtopography of the surface of Steel 45 (0.45 % C) specimens:

а – initial, without treatment; *б* – after borocoppering for 3 hours; *в* – after borocoppering for 4 hours; *г* – after borocoppering for 5 hours

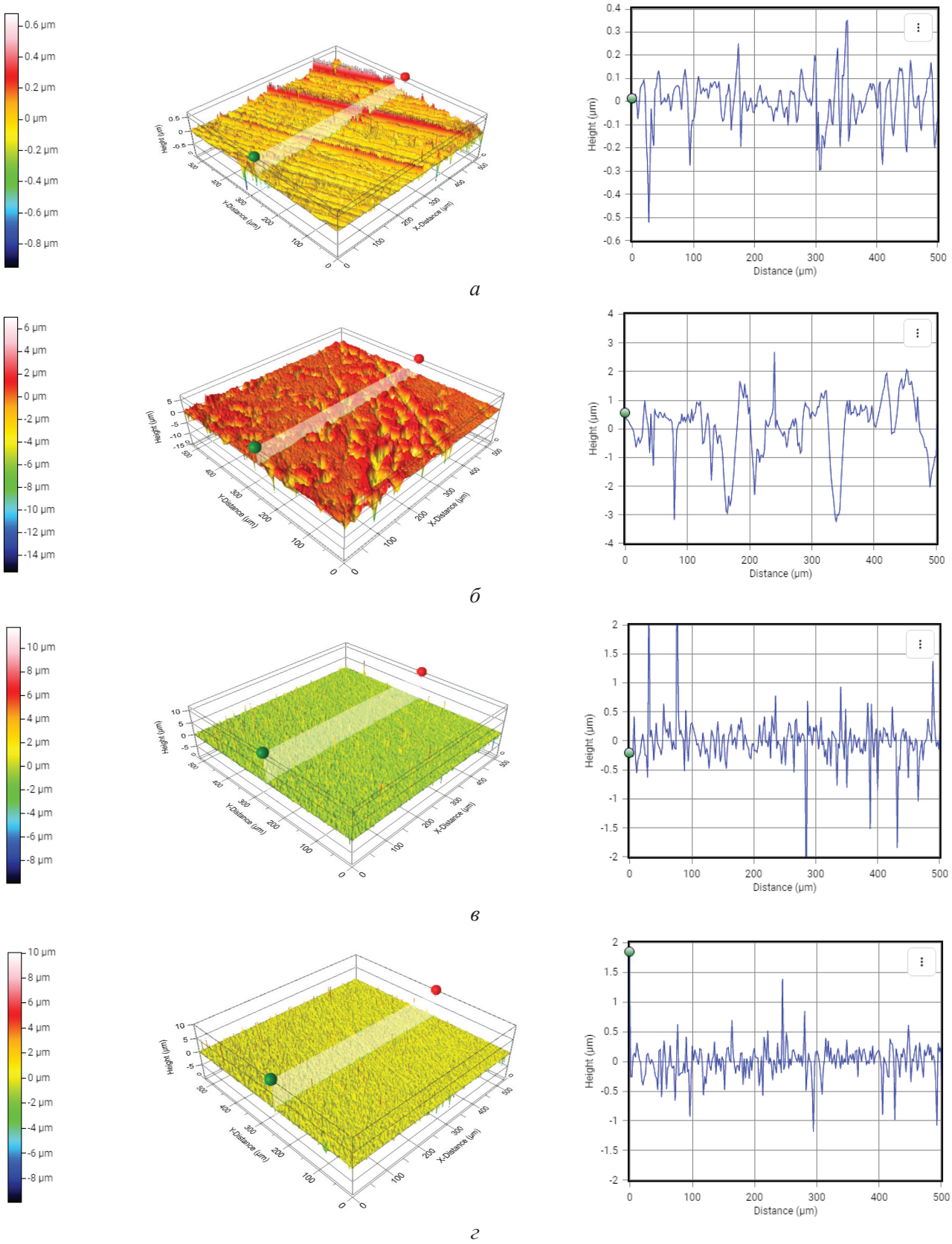


Рис. 12. Микротопография поверхности образцов из стали У10:

а – исходного, без обработки; *б* – после боромеднения в течение 3 часов; *в* – после боромеднения в течение 4 часов; *г* – после боромеднения в течение 5 часов

Fig. 12. Microtopography of the surface of Steel U10 (1.0 % C) specimens:

а – initial, without treatment; *б* – after borocoppering for 3 hours; *в* – after borocoppering for 4 hours; *г* – after borocoppering for 5 hours

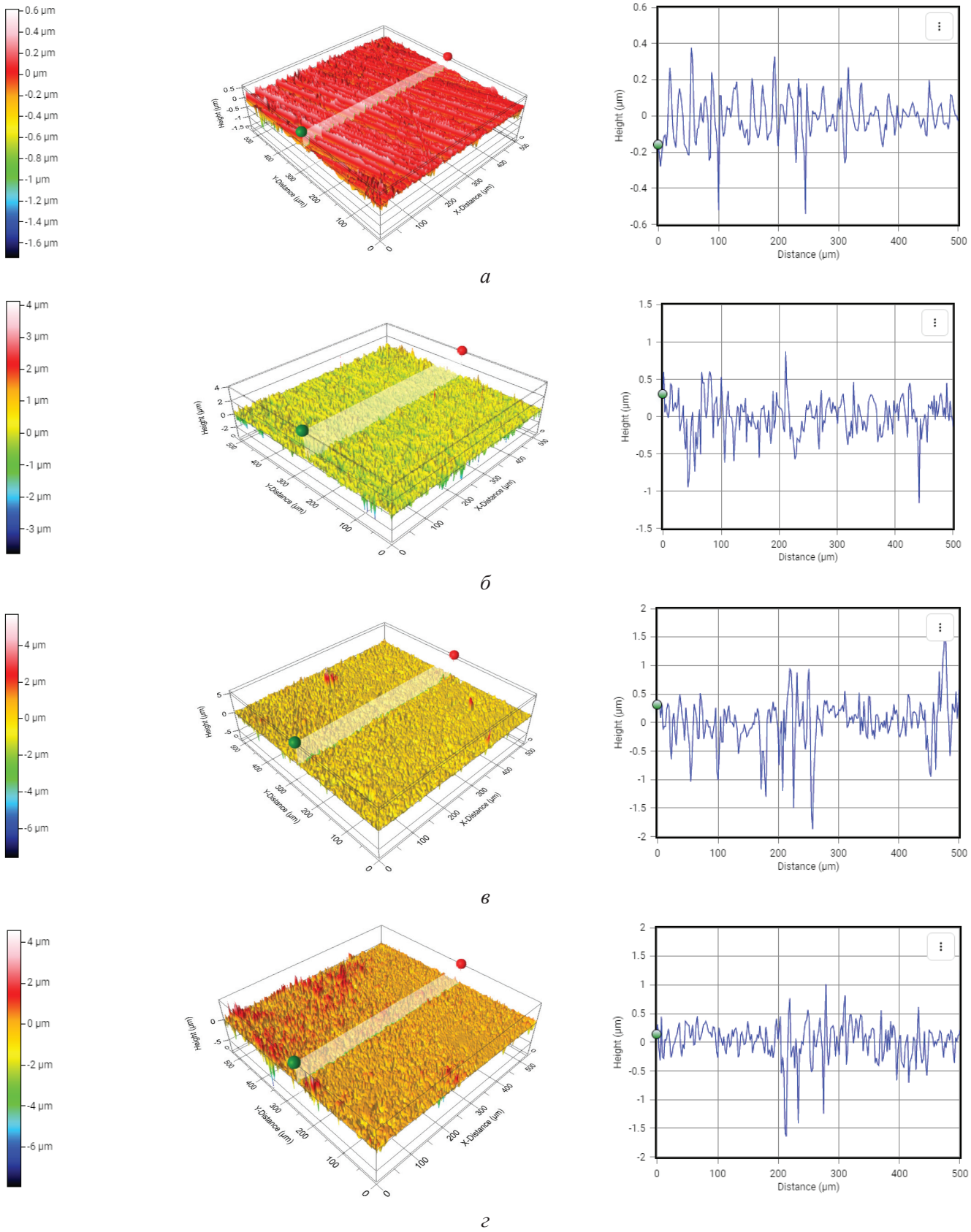


Рис. 13. Микротопография поверхности образцов из стали 5ХНМ:

а – исходного, без обработки; *б* – после боромеднения в течение 3 часов; *в* – после боромеднения в течение 4 часов; *г* – после боромеднения в течение 5 часов

Fig. 13. Microtopography of the surface of 0.5C-Cr-Ni-Mn steel specimens:

а – initial, without treatment; *б* – after borocoppering for 3 hours; *в* – after borocoppering for 4 hours; *г* – after borocoppering for 5 hours

Таблица 5
Table 5

Шероховатость поверхностей образцов после ХТО (рис. 11–13)
Roughness of the specimens after *TCT* (fig. 11–13)

Вид обработки	сталь 45	У10	5ХНМ
	Ra, мкм		
Исходный, без обработки	0,06	0,062	0,084
Боромеднение в течение 3 часов	0,2	0,187	0,175
Боромеднение в течение 4 часов	0,16	0,201	0,273
Боромеднение в течение 5 часов	0,176	0,189	0,211

Выводы

На основании проведенных исследований установлено, что насыщение образцов из сталей 45, У10 и 5ХНМ в течение 3, 4 и 5 часов приводит к образованию диффузионных слоев, толщина которых варьируется от 110 до 230 мкм.

Установлено, что прирост толщины диффузионного слоя на стали 45 составил 41 % при увеличении времени обработки на 2 часа. На сталях У10 и 5ХНМ значения прироста толщины слоя составили 40 и 77 % соответственно. Для указанных марок сталей рекомендуется более продолжительная выдержка при боромеднении.

Установлено, что при времени проведения диффузионного боромеднения в течение 4 часов наблюдается наибольший прирост толщины диффузионного слоя.

При исследовании микротопографии выявлено, что шероховатость после боромеднения увеличивается до *Ra* 0,16…0,2 мкм при исходной *Ra* 0,06…0,08 мкм для сталей 45, У10 и 5ХНМ, при этом продолжительность процесса не оказывает влияния на увеличение шероховатости.

Список литературы

1. *Busby P.E., Warga M.E., Wells C.* Diffusions and solubility of boron in iron and steel // JOM. – 1953. – Vol. 5. – P. 1463–1468. – DOI: 10.1007/BF03397637.

2. Boriding of steel: improvement of mechanical properties – a review / M. Prince, G. Surya Raj, D. Yaswanth Kumar, P. Gopalakrishnan // High Temperature Material Processes. – 2022. – Vol. 26 (2). – P. 43–89. – DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022041805.

3. *Шевчук Е.П., Плотников В.А., Бектасова Г.С.* Диффузия бора при борировании углеродистой стали // Известия Алтайского государственного университета. – 2021. – № 1 (117). – С. 64–65. – DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-10.

4. FeB/Fe_2B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics / L.G. Yu, X.J. Chen, K.A. Khor, G. Sundararajan // Acta Materialia. – 2005. – Vol. 53. – P. 2361–2368. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.01.043.

5. A microstructure comparison of Iron borides formed on AISI 1040 and D2 steels / J. Bernal-Ponce, A. Irvin-Martinez, E. Vera-Cardenas, A. Garcia-Barrientos, A. Medina-Flores, L. Bejar-Gomez, S. Borjas-Garcia // Microscopy and Microanalysis. – 2015. – Vol. 21, suppl. 3. – P. 1759–1760. – DOI: 10.1017/S1431927615009575.

6. *Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Ишков А.В.* Состав, структура и свойства износостойких покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 2. – С. 68–72.

7. *Балановский А.Е., Ву В.* Плазменная поверхностная цементация с использованием графитового покрытия // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 175–179. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179.

8. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, M.G. Shtayger, S.K. Kargapoltsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.

9. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction / T.G. Cherkasova, E.V. Cherkasova, A.V. Tikhomirova, N.V. Gilyazidinova, R.V. Klyuev, N.V. Martyushev, A.I. Karlina, V.Yu. Skiba // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1324–1330. – DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.

10. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeeba, A.I. Karlina // Metal-

lurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

11. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials / O.I. Nokhrina, R.A. Gizatulin, M.A. Golodova, I.E. Proshunin, D.V. Valuev, N.V. Martyushev, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1429–1448. – DOI: 10.1007/s11015-022-01289-z.

12. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere / N.N. Malushin, N.V. Martyushev, D.V. Valuev, A.I. Karlina, A.P. Kovalev, R.A. Gizatulin // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1468–1475. – DOI: 10.1007/s11015-022-01292-4.

13. *Balanovskiy A.E., Van Huy V.* Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear // Journal of Friction and Wear. – 2018. – Vol. 39. – P. 311–318. – DOI: 10.3103/S1068366618040025.

14. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

15. *Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E.* Study of the formation of the alloyed surface layer during plasma heating of mixtures of Cu-Sn CrXCY alloys // Tribology in Industry. – 2021. – Vol. 43. – P. 386–396. – DOI: 10.24874/ti.1070.03.21.05.

16. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Yu. Teplykh, V.G. Burov, S.V. Veselov // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 245–253. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.

17. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 284, iss. 2. – P. 472–481. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

18. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhiyn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // Lubricants. – 2020. – Vol. 8, iss. 3. – P. 26. – DOI: 10.3390/lubricants8030026.

19. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser / A. Bartkowska, D. Bartkowski, D. Przestacki, J. Hajkowski, A. Miklaszewski // Coatings. – 2021. – Vol. 11. – P. 608. – DOI: 10.3390/coatings11050608.

20. Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel / A. Bartkowska, A. Pertek, M. Kulka, L. Klimek // Optics and Laser Technology. – 2015. – Vol. 74. – P. 145–157. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.05.014.

21. Исследование формирования диффузионных слоев на стали 20 при одновременном насыщении бором и медью / С.А. Лысых, Ю.П. Хараев, В.Н. Корнопольцев, В.А. Бутуханов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – С. 56–60. – URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37159 (дата обращения: 06.02.2023).

22. Формирование диффузионных слоев и исследование шероховатости при комплексном насыщении поверхности стали 5ХНМ бором и медью / С.А. Лысых, Ю.П. Хараев, В.Н. Корнопольцев, Х.С. Чжун, Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев // Ползуновский вестник. – 2020. – № 3. – С. 77–82. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.013.

23. *Хараев Ю.П., Корнопольцев В.Н., Лысых С.А.* Определение состава смеси при поверхностном упрочнении стали бором и медью // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 142–144.

24. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием B-Al-слоев химико-термической обработкой / Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн, А.Г. Тихонов, А.И. Шустов, А.С. Пятых // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 1, № 12 (204). – С. 557–564. – DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.

25. *Pyatykh A., Savilov A., Timofeev S.* Investigation of Hadfield steel machinability in milling operations // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 123–128. – DOI: 10.4028/p-8p4ud2.

26. *Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

27. *Лабунец В.Ф., Ворошнин Л.Г., Киндарчук М.В.* Износостойкие боридные покрытия. – Киев: Техника, 1989. – 253 с.

28. *Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б.* Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 244 с. – ISBN 5-7691-1405-3.

29. *Кайдаш Н.Г., Четверикова Л.Н.* Структура и свойства боридосилицидных покрытий на железе и стали // Вестник Черкасского национального университета. Серия: Физико-математические науки. – 2007. – № 114. – С. 89–115.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 1 pp. 131–148
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

The effect of borocoppering duration on the composition, microstructure and microhardness of the surface of carbon and alloy steels

Stepan Lysykh [1, a, *], *Vasily Kornopoltsev* [2, b], *Undrakh Mishigdorzhiyn* [1, c], *Yuri Kharaev* [3, d], *Aleksandr Tikhonov* [4, e], *Vladimir Ivancivsky* [5, f], *Nikita Vakhrushev* [5, g]

[1] Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation
[2] Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047 Russian Federation
[3] East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya str, Ulan-Ude, 670013, Russian Federation
[4] Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation
[5] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-1421-5251, lysyh.stepa@yandex.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-1970-2945, kompo@mail.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-7863-9045, undrakh@ipms.bscnet.ru, [d] https://orcid.org/0000-0001-6449-4175, kharaev@inbox.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-4917-9916, tihonovalex90@mail.ru, [f] https://orcid.org/0000-0001-9244-225X, ivancivskij@corp.nstu.ru,
[g] https://orcid.org/0000-0002-2273-5329, vah_nikit@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 December 2022
Revised: 09 January 2023
Accepted: 03 February 2023
Available online: 15 March 2023

Keywords:
Thermochemical treatment (*TCT*)
Borocoppering
Diffusion layer
Carbon steel
Alloy steel
Microhardness
Roughness

Funding
The study of carbon *Steel 45 (0.45% C)* and *Steel U10 (1.0% C)* was carried out within the framework of the state task of the *BINM SB RAS No. 0273-2021-0007*. The study of *0.5C-Cr-Ni-Mn* alloy steel was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (*project 19-79-10163-P*).

Acknowledgements
Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials" and the Science Center "Scientific Instruments" of the Dorji Banzarov Buryat State University. The authors express their gratitude to Ulakhanov Nikolay Sergeevich and Gulyashinov Pavel Anatolyevich for their help in coordinating experimental research.

ABSTRACT

Introduction. Borocoppering is one of the methods of thermochemical treatment (*TCT*) aimed at forming diffusion layers with high physical and mechanical properties on the surface of carbon and alloy steels. The thickness of the diffusion layer is the most important characteristic of the *TCT*, which determines the depth of hardening. Consequently, the intensity and main characteristics of the *TCT* (layer thickness, alloying element concentration profile) depend on the process conditions (temperature, duration, and amount of alloying element). **The purpose of this work** is to determine the temperature-time parameters of diffusion borocoppering, which contribute to the formation of diffusion layers with a maximum thickness. The paper considers the results of surface hardening of carbon and alloy steels (for example, *Steel 45 (0.45% C)*, *Steel U10 (1.0% C)*, and *0.5C-Cr-Ni-Mn* steel) by high-temperature soaking in powder mixtures containing boron and copper. Borocoppering was carried out in sealed containers with the powder mixture consisting of boron carbide, copper oxide, and sodium fluoride as an activator at a temperature of 950 °C for 3–5 h. The resulting specimens with a diffusion layer were examined using an optical microscope and a scanning electron microscope (*SEM*); the microhardness, elemental and phase composition of the layers were also determined, as well as the roughness of the obtained surfaces. **Results and discussions.** The microstructure of the obtained diffusion layers is studied; diagrams of the changes in the layers' thickness and the microhardness distribution over the layers' thickness are shown. It is established that with an increase in the soaking time from 3 to 5 h, the thickness of the diffusion layer increases from 120 to 170 µm on *Steel 45 (0.45% C)*; from 110 to 155 µm on *Steel U10 (1.0% C)* and from 130 to 230 µm on *0.5C-Cr-Ni-Mn* steel. A gradual decrease in the concentration of boron and copper along the layer thickness from 15–16% and 2–3% on the surface, respectively, to zero values at the boundary with the base metal is revealed. It is established that borocoppering to the formation of more thick boride layers on the surface of carbon and alloy steels compared to pure boriding. Moreover, an increase in the duration of soaking during the process contributes to the greatest increase in the thickness of the layer on *0.5C-Cr-Ni-Mn* steel. A study of microgeometry is carried out, microtopographies and profilograms of specimens' surfaces are shown before and after borocoppering. It is established that the roughness after borocoppering increases by 2-3 times compared to the initial one, and an increase in the duration of the process does not have a significant effect on the roughness.

For citation: Lysykh S.A., Kornopoltsev V.N., Mishigdorzhiyn U.L., Kharaev Yu.P., Tikhonov A.G., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V. The effect of borocoppering duration on the composition, microstructure and microhardness of the surface of carbon and alloy steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 131–148. DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148. (In Russian).

*** Corresponding author**
Lysykh Stepan A., Junior researcher
Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS,
6 Sakhyanovoy str.,
670047, Ulan-Ude, Russian Federation
Tel.: *8-924-397-24-76*, **e-mail:** lysyh.stepa@yandex.ru

References

1. Busby P.E., Warga M.E., Wells C. Diffusions and solubility of boron in iron and steel. *JOM*, 1953, vol. 5, pp. 1463–1468. DOI: 10.1007/BF03397637.

2. Prince M., Surya Raj G., Yaswanth Kumar D., Gopalakrishnan P. Boriding of steel: improvement of mechanical properties – a review. *High Temperature Material Processes*, 2022, vol. 26 (2), pp. 43–89. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022041805.

3. Shevchuk E.P., Plotnikov V.A., Bektasova G.S. Diffuziya bora pri borirovanii uglerodistoi stali [Boron diffusion during carbon steel boriding]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya of Altai State University*, 2021, no. 1 (117), pp. 64–65. DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-10.

4. Yu L.G., Chen X.J., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe_2B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, pp. 2361–2368. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.01.043.

5. Bernal-Ponce J., Irvin-Martinez A., Vera-Cardenas E., Garcia-Barrientos A., Medina-Flores A., Bejar-Gomez L., Borjas-Garcia S. A microstructure comparison of Iron borides formed on AISI 1040 and D2 steels. *Microscopy and Microanalysis*, 2015, vol. 21, suppl. 3, pp. 1759–1760. DOI: 10.1017/S1431927615009575.

6. Mishustin N.M., Ivanaiskii V.V., Ishkov A.V. Sostav, struktura i svoistva iznosostoikikh pokrytii, poluchennykh na stalyakh 65G i 50KhGA pri skorostnom TVCh-borirovanii [Composition, structure and properties of wear-resistant coatings obtained on steels 65G and 50KhGA with high-speed high-frequency boriding]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 2, pp. 68–72.

7. Balanovskii A.E., Vu V. Plazmennaya poverkhnostnaya tsementatsiya s ispol'zovaniem grafitovogo pokrytiya [Plasma surface carburizing with graphite paste]. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 175–179. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179.

8. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapoltsev S.K., Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Sivtsov A.V., Nebogin S.A. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.

9. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Yu. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1324–1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.

10. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeeba V.Yu., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

11. Nokhrina O.I., Gizatulin R.A., Golodova M.A., Proshunin I.E., Valuev D.V., Martyushev N.V., Karlina A.I. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1429–1448. DOI: 10.1007/s11015-022-01289-z.

12. Malushin N.N., Martyushev N.V., Valuev D.V., Karlina A.I., Kovalev A.P., Gizatulin R.A. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1468–1475. DOI: 10.1007/s11015-022-01292-4.

13. Balanovskiy A.E., Van Huy V. Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, pp. 311–318. DOI: 10.3103/S1068366618040025.

14. Balanovskiy A.E., Shtayger M.G., Karlina A.I., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

15. Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E. Study of the formation of the alloyed surface layer during plasma heating of mixtures of Cu-Sn CrXCY alloys. *Tribology in Industry*, 2021, vol. 43, pp. 386–396. DOI: 10.24874/ti.1070.03.21.05.

16. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.

17. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, iss. 2, pp. 472–481. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

18. Mishigdorzhiyn U., Chen Y., Ulakhanov N., Liang H. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing. *Lubricants*, 2020, vol. 8, iss. 3, p. 26. DOI: 10.3390/lubricants8030026.

19. Bartkowska A., Bartkowski D., Przestacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*, 2021, vol. 11, p. 608. DOI: 10.3390/coatings11050608.

20. Bartkowska A., Pertek A., Kulka M., Klimek L. Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel. *Optics and Laser Technology*, 2015, vol. 74, pp. 145–157. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.05.014.

21. Lysykh S.A., Kharaev Yu.P., Kornopoltsev V.N., Butukhanov V.A. Issledovanie formirovaniya diffuzionnykh sloev na stali 20 pri odnovremennom nasyshchenii borom i med'yu [The study of formation of diffusion layers on steel 20 with the simultaneous saturation with boron and copper]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*, 2018, no. 9, pp. 56–60.

22. Lysykh S.A., Kharaev Yu.P., Kornopoltsev V.N., Zhong H.X., Lygdenov B.D., Guryev A.M. Formirovanie diffuzionnykh sloev i issledovanie sherokhovatosti pri kompleksnom nasyshchenii poverkhnosti stali 5KhNM borom i med'yu [Formation of diffusion layers and investigation of roughness at complex saturation of the steel surface with 5KhNM boron and copper]. *Polzunovskii vestnik = Polzunov Bulletin*, 2020, no. 3, pp. 77–82. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.013.

23. Kharaev Yu.P., Kornopoltsev V.N., Lysyh S.A. Opredelenie sostava smesi pri poverkhnostnom uprochnenii stali borom i med'yu [Identification of a mixture of surface hardening steel with boron and copper]. *Polzunovskii al'manakh = Polzunov Almanac*, 2016, no. 4, pp. 142–144.

24. Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiyn U.L., Tikhonov A.G., Shustov A.I., Pyatykh A.S. Modifikatsiya poverkhnostnogo sloya shtampovykh stalei sozdaniem B-Al-sloev khimiko-termicheskoi obrabotkoi [Surface modification of die steels with B-Al-layers by thermal-chemical treatment]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2021, vol. 17, no. 12 (204), pp. 557–564. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.

25. Pyatykh A., Savilov A., Timofeev S. Investigation of hadfield steel machinability in milling operations. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 123–128. DOI: 10.4028/p-8p4ud2.

26. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical-thermal treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 256 p.

27. Labunets V.F., Voroshnin L.G., Kindarchuk M.V. *Iznosostoikie boridnye pokrytiya* [Wear resistant boride coatings]. Kiev, Tekhnika Publ., 1989. 253 p.

28. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Hardening protective coatings in mechanical engineering]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2004. 244 p. ISBN 5-7691-1405-3.

29. Kaidash N.G., Chetverikova L.N. Struktura i svoistva boridosilitsidnykh pokrytii na zheleze i stali [Structure and properties of coatings borosilicide on iron and steel]. *Vestnik Cherkasskogo natsional'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, 2007, no. 114, pp. 89–115.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Уважаемые ***Авторы***, в связи с включением журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования *Web of Science* и *Scopus* изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (*Abstract*) и список использованной автором литературы (*References*), поскольку именно они, а не текст самой статьи, находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности *Abstract* и *References* должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно в интересах автора тщательно подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

В журнале публикуются результаты **оригинальных** фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. **Опубликованные ранее научные работы не принимаются к рассмотрению и изданию!** Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» зарегистрирован по следующим научным специальностям: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; Технология машиностроения; Сварка, родственные процессы и технологии; Машины, агрегаты и процессы (по отраслям); Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; Порошковая металлургия и композиционные материалы; Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям); Материаловедение (по отраслям). **Издание имеет право опубликовать научные работы в рамках указанных специальностей! Публикация статей бесплатная!**

В связи с тем, что журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» принимает оригинальные научные статьи в формате *Full Article* – стандартный формат для завершенных научных исследований, объем основного текста работы должен составлять не менее 18–20 страниц машинописного текста через 1,5 интервала) (учитывается тело статьи без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 стр. **Научная статья должна иметь структуру *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results And Discussion*)**: • **Введение** (*Introduction*);• **Методы / Методика исследований** (*Methods*); • **Результаты** (*Results*); • **Обсуждение** (*Discussion*);• **Заключение** (*Conclusion*).

Как подать статью

Для того чтобы подать статью, **автор** (**все соавторы**) должен быть зарегистрирован на сайте журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/registration . Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Важно: работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику.

График выхода журнала в течение года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.

Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы **Антиплагиат**. **Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %.**

Рукопись статьи готовится в соответствии с **правилами оформления** в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Сканированные лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (**цветной режим сканирования**, **разрешение не менее 600 dpi**) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg.

По окончании всех работ обязательно **нажать кнопку «Отправить в редакцию».**

Одновременно со статьей высылается оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается **авторский лицензионный договор.**

Все рукописи рецензируются. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Правила оформления рукописи

«Правила оформления» (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules). Просим внимательно ознакомиться со всеми пунктами, представленными в данном разделе.

При оформление своей работы рекомендуется воспользоваться шаблоном, представленным на сайте журнала: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx .

Аффилиация авторов

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов). Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код **ORCID** (Open Researcher and Contributor ID), РИНЦ AuthorID и электронная почта. Если отсутствует **ORCID**, то необходимо пройти по ссылке **https://orcid.org/** и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

После регистрации ORCID необходимо ОТРЕДАКТИРОВАТЬ СВОИ ПЕРСОНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ В ДАННОМ ПРОФИЛЕ (**«пустой» профиль ORCID'а не допустим!)**. При подкачке статей предпочтение отдавайте англоязычным источникам. **Кроме того, рекомендуется: при регистрации профиля в ORCID'е использовать латинский алфавит, а не кириллицу**!!!; указывать полное имя, а не сокращенное. Не путайте местами Имя (First name) и Фамилию (Last name). Если обнаружились такие ошибки, – обязательно сделайте коррекцию своего профиля! После заполнения профиля необходимо обеспечить доступ к публичной информации.

Огромная просьба ко всем авторам – проверить и подкорректировать данные в своих профилях на платформах SCOPUS и WoS. Указать все свои цифровые идентификаторы (ЦИ) в профиле на сайте журнала. Внимание! При внесении соответствующего ЦИ, прежде чем сохранить введенные значения в профиле, необходимо посмотреть пример и кликнуть на рядом располагающуюся кнопку «*Проверка профиля*». Если введенные значения верны, то издательская система журнала откроет соответствующую страницу в интернете с вашими данными. Будьте внимательны, когда вводите РИНЦ AuthorID. Данный цифровой идентификатор нельзя путать с SPIN-кодом.

Внимание! РИНЦ AuthorID должен быть введен каждым автором в свой профиль на сайте журнала.

Научная статья должна иметь структуру *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results And Discussion*):

- название (*Title*);
- аннотация (*Abstract*);
- введение (***I**ntroduction*);
- методы (***M**ethods*);
- результаты (***R**esults*);
- обсуждение (***D**iscussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements* / *Funding*);
- список литературы (*References*).

АННОТАЦИЯ к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (сле-

довать логике описания результатов в статье) (см. примеры в разделе «Правила оформления»). Аннотация должна включать следующие аспекты содержание статьи: *обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы*.

В аннотации Вы должны выдержать структуру **IMRAD** и **четко указать в тексте (как для русской, так и для английской версии)** соответствующие разделы: **Introduction** (**введение**); **Methods** (**методы**); **Results And Discussion** (**результаты и обсуждения**) (*см. пример*).

Объем аннотации (реферата) на русском языке должен быть 200…250 слов. Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!

Пример структурированной аннотации

• На русском языке

Введение. Сварка оказывает большое влияние на работоспособность создаваемых конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, вследствие снижения сопротивляемости зарождению и распространению трещин в зоне термического влияния и металла шва. Несмотря на существующее достаточно большое количество способов повышения надежности сварных соединений, некоторые из них сейчас полностью исчерпали свои возможности, а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому разработка необходимой специальной технологии сварки в условиях низких температур остается актуальной проблемой. **Цель работы:** изыскание путей повышения надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения при сварке в условиях низких температур. **В работе исследованы** сварные соединения стали 09Г2С, полученные сваркой на постоянном токе и в режиме импульсной низкочастотной модуляции тока в условиях положительных (+20 ^{o}C) и отрицательных (-45 ^{o}C) температур окружающего воздуха с применением трех новых марок сварочных электродов. **Методами исследования** являются механические испытания на статистическое растяжение и на ударный изгиб образцов сварных соединений, а также спектральный анализ химического состава и металлографические исследования металла шва. **Результаты и обсуждение**. Выявлено, что эксплуатационные показатели металлоконструкций зависят от выбора способа и температуры выполнения сварки, а также характеристик сварочного материала. Установлено, что для повышения значений ударной вязкости образцов, сваренных в условиях отрицательных температур методом адаптивной импульсно-дуговой сварки, требуется увеличение тепловложения, относительно погонной энергии, реализуемой в процессе сварки образцов при положительной температуре. Подтверждён эффект измельчения структуры металла шва при использовании адаптивной импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами, в том числе и в условиях отрицательной температуры окружающего воздуха (вплоть до –45 °C). Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на получение новых классов материалов и изделий из них, предназначенных для работы в условиях Севера и Арктики.

• На английском языке

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide practical application. Therefore, the development of the necessary special welding technology in low temperature conditions remains an urgent problem. **The purpose of the work:** to find the ways to improve the reliability of high-duty metal constructions welded at low temperatures. The welded joints of 09G2S steel obtained by welding with direct current and pulsed low-frequency current modulation under conditions of positive (+ 20 °C) and negative (–45 °C) ambient air temperatures **are investigated** using three new types of welding electrodes. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and impact bending of welded samples, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallurgical studies of weld metal are undertaken. **Results and Discussion**. It is revealed that the metal constructions operational factors depend on the choice of the welding method and welding temperature, as well as the characteristics of the welding material. It is established that to increase the impact strength of samples welded at negative temperatures by the adaptive pulse-arc welding method, an increase in heat input is required, relative to the rat of energy input, realized in the process of welding at positive temperature. The effect of the weld metal structure refinement using adaptive pulse-arc welding with coated electrodes is confirmed, including in conditions of negative ambient air temperature (down to 45 °C below zero). The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at obtaining new classes of materials and products, intended for operation in the conditions of the North and the Arctic.

ВВЕДЕНИЕ / *Introduction*

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа) (1,5–2 страницы). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная про-

блема, которая рассматривается в вашей статье. В связи с этим в данном разделе следует представить достаточно информированный (с равномерно распределенными ссылками на источники) литературный обзор по состоянию обозначенной проблемы. В конце раздела «**Введение**» формулируются **цель работы** и **обозначаются задачи**, решение которых позволит достичь поставленной цели. Не нужно в данном разделе говорить о конкретном результате, поскольку в структуре статьи есть соответствующий раздел.

МЕТОДЫ (МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ) / *Methods*

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по Госстандарту.

При проведении испытаний приводится следующая информация. 1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда. 2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т. д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ / *Results And Discussion*

Это раздел содержит краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований.

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно для того, чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшает работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел, для того чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Данный раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, показать перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ) / *Conclusion*

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

Качество графического материала!

По требованиям журнала графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах. Разрешение рисунков не ниже **600 dpi**. Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (на **русском и на английском языке!**). Шрифты на рисунках должны быть увеличены и приведены к единообразию. Уважаемые авторы, журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является полноцветным печатным изданием. В вашей работе присутствуют рисунки, которые (для повышения наглядности) рекомендуется сделать цветными.

Название таблиц (как и внутреннее содержание) должно быть как на русском, так и на английском языках! (см. **«Правила оформления»**)

Математические формулы: сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны **только в редакторе формул Microsoft Equation 3.0**!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / *References*

Список цитируемой литературы включает источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации. Количество литературных ссылок должно быть **не менее 20** с большей (**более 50 %**) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать **15–17 %**. Если работа была издана и на русском и на английском (или других) языках, то в списке литературы и в *References* лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (**ГОСТ 7.0.5–2008**) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. http://ru.translit.net/?account=bsi) или (https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bsi).

Если статья имеет DOI – обязательно указать его! Если книга имеет ISBN – обязательно указать его!

Обратите внимание на правила оформления русскоязычных источников в англоязычном блоке статьи (в References).

Финансирование

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) …».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считаются авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Конфликт интересов

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «Авторы заявляют об отсутствии конфликта ин-

тересов» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «The author declare no conflict of interest»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules .

Уважаемые Авторы, журнал «*Обработка металлов* (*технология • оборудование • инструменты*)» успешно прошел процедуру перерегистрации в РОСКОМНАДЗОРе и, начиная с 2021 г., перешёл на выпуск научного издания на двух языках. Первое – печатное (основное) – на русском языке с англоязычной частью; второе – в электронном формате (pdf) – полностью вся работа на английском языке. **После получения сообщения о принятии статьи к опубликованию в журнале** «*Обработка металлов* (*технология • оборудование • инструменты*)» **авторам необходимо предоставить качественный перевод своей статьи на английский язык** (машинный перевод не допускается!). Форматирование англоязычной версии работы выполнять согласно шаблону. **Внимание!** Англоязычный вариант статьи необходимо прислать на почту журнала (metal_working@mail.ru) в течение двух недель после принятия работы к печати!

Внимание! Уточняющая информация по опубликованной статье.

Уважаемые читатели, статья «Теоретический анализ способов пассивного шлифования рельсов», опубликованная в № 3, 2022, с. 22-39, выполнена на основе результатов исследований с использованием мер государственной поддержки на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по теме «Высокопроизводительная технология скоростного шлифования рельсов и оборудование для её реализации на основе интеллектуальных цифровых модулей», соглашение № 075-11-2022-014 от «08» апреля 2022 г.».

Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»

EDITORIAL MATERIALS

Dear Authors, in view of the inclusion of the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" in the international databases of bibliographic description and scientific citation *Web of Science* and *Scopus*, the rules for formatting submitted manuscripts have been changed. The main goal of the changes is to make the main provisions and conclusions of the papers published in the journal accessible to a wide foreign audience that does not speak Russian. The English Abstract of the paper and the References used by the author(s) are now of particular importance, since References and not the text of the paper itself, are reflected in the *Scopus* and *Web of Science* systems. In terms of its content and informative value, the Abstract and References should draw the attention of foreign readers to the subject of the paper. Accordingly, it is in the interests of the author(s) to be scrupulous about the preparation of these blocks of the paper and ensure its highest possible quality.

The journal mainly publishes the results of **original** fundamental, applied and exploratory scientific research and post-graduate work. **Previously published scientific works are not accepted for consideration and publication!** Considerable attention is paid to the publication of review, problematic and discussion papers on topical issues of machine building and modern metallurgy and materials science. We are registered in the State commission for academic degrees and titles in the following scientific specialties: Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing; Engineering technology; Welding, related processes and technologies; Machines, units and processes (by industry); Metallurgy and heat treatment of metals and alloys; Powder metallurgy and composite materials; Nanotechnologies and nanomaterials (by industry); Materials science (by industry). **The journal has the right to publish scientific papers within the specified specialties! The publication of papers is free.**

Due to the fact that the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" accepts original scientific papers in the *Full Paper* format – the standard format for completed scientific research, it is recommended to enlarge the main text of the work (the body of the paper is taken into account, without lists of references) – 18–20 typewritten pages, 1.5 spacing. In the case when the work is declared as an overview, the volume should be increased to 30 pages. **The scientific paper** should have the structure of ***IMRAD*** (•*Introduction*, •*Methods*, •*Results*, •*Discussion*, •*Conclusion*).

Paper submission

In order to submit a paper, the **author (all co-authors!)** should be signed up for the journal website. The author (one of the co-authors) in his office selects the "Submit a paper" in the menu and enters all the necessary data. The author selects his/her co-authors from the list of registered users.

Important: The work should be received no later than 3 months before the official publication of the issue according to the schedule. In exceptional cases, in agreement with the editors of the journal, the deadline for submitting a paper to the next issue can be extended, but not more than two weeks.

Schedule of the journal publication during the year

Issue	*Publication (month, date)*
1	03/15
2	06/15
3	09/15
4	12/15

Before sending the manuscript to the editors, the authors are highly recommended to check their paper using the **Anti-plagiarism** system. The allowable percentage of text borrowing from other sources is 5–10 %.

The manuscript of the paper is prepared in accordance with the formatting rules in MS Word and is attached in *.doc, *.docx format.

The scanned license agreement with the signatures of the authors and the expert opinion (**color mode, resolution of at least 600 dpi**) should also be attached on the journal's website in the "Submit Paper" section in *.pdf, *.jpg, *.jpeg formats.

At the end of all the work, be sure to click the "Send to the Editor" button.

Simultaneously with the article, the original expert opinion on the possibility of open publication of the article is sent to the postal address of the editorial office: 630073, Novosibirsk, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk State Technical University (NSTU), bldg. 5, com. 137VTs, the deputy editor-in-chief Vadim Y. Skeeba.

When a manuscript is accepted for publication, an **author's license agreement** is additionally sent to the postal address of the editorial office.

All manuscripts are reviewed. There is no fee for publishing manuscripts.

Paper submission guidelines:

See the section "Paper Submission guidelines" (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules). Please read carefully all the points presented in these sections.

When formatting your work, it is recommended to use the template presented on the journal's website: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Authors affiliation

A list of authors should contain Full names. Names and Surnames of the author(s) should be written out. The full name of the organization for each of the authors, indicating the street, house number, city, postal code and country also should be written. For each of the authors, it is MANDATORY to indicate its unique identification code ORCID (Open Researcher and Contributor ID), RSCI AuthorID and e-mail. If there is no ORCID, then it is necessary to follow the link **https://orcid.org/** and register in the system. After registration, you need to edit your personal data and the list of publications.

After registering ORCID, you need to EDIT YOUR PERSONAL DATA AND THE LIST OF PUBLICATIONS IN THIS PROFILE (**"an empty" ORCID profile is not allowed!**). When uploading papers, give preference to English-language sources. **It is also recommended: when registering a profile in ORCID, use the Latin alphabet, not Cyrillic!**; indicate the full name, not the abbreviation. Do not confuse First name and Last name. If such errors are found, be sure to correct your profile! After filling out the profile, it is necessary to provide access to public information.

A huge request to all authors is also to check and correct the data in their profiles on the SCOPUS and WoS platforms. Indicate all your digital identifiers (CI) in your profile on the journal's website. **Attention!** When entering the corresponding CI, before saving the entered values in the profile, you need to look at the example and click on the "Check Profile" button located next to it. If the entered values are correct, the publishing system of the journal will open the corresponding page on the Internet with your data. Be careful when entering the RSCI AuthorID. This digital identifier should not be confused with the SPIN code.

Attention – the RSCI AuthorID should be entered by each author in his/her profile on the journal's website!

The scientific paper should have the structure of *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results and Discussion*):

- *Title*;
- *Abstract*;
- ***I**ntroduction*;
- ***M**ethods*;
- ***R**esults*;
- ***D**iscussion*;
- *Conclusion*;
- *Acknowledgements / Funding*;
- *References*.

Abstract

Paper ***abstract*** should be: informative (do not contain general words); original; meaningful (reflect the main content of the paper and the research results); structured (follow the results description logic) (see examples in the section "Paper Submission guidelines"). The abstract should include the following aspects of the content of the paper: *the rationale; the subject*; *the purpose of the work*; *method or methodology of the work*; *results of work*; *the field of application of the results*; *conclusions*.

In the abstract, you should adhere to the structure of **IMRAD** and **clearly indicate in the text (for both Russian and English versions)** the corresponding sections: **Introduction**; **Methods**; **Results and Discussion** (*see an example*).

The volume of the abstract in English should be at least 250 words!

An example of a structured abstract:

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide practi-

cal application. Therefore, the development of the necessary special welding technology in low temperature conditions remains an urgent problem. **The purpose of the work:** to find the ways to improve the reliability of high-duty metal constructions welded at low temperatures. The welded joints of 09G2S steel obtained by welding with direct current and pulsed low-frequency current modulation under conditions of positive (+ 20 °C) and negative (-45 °C) ambient air temperatures **are investigated** using three new types of welding electrodes. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and impact bending of welded samples, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallurgical studies of weld metal are undertaken. **Results and Discussion**. It is revealed that the metal constructions operational factors depend on the choice of the welding method and welding temperature, as well as the characteristics of the welding material. It is established that to increase the impact strength of samples welded at negative temperatures by the adaptive pulse-arc welding method, an increase in heat input is required, relative to the rat of energy input, realized in the process of welding at positive temperature. The effect of the weld metal structure refinement using adaptive pulse-arc welding with coated electrodes is confirmed, including in conditions of negative ambient air temperature (down to 45 °C below zero). The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at obtaining new classes of materials and products, intended for operation in the conditions of the North and the Arctic.

Introduction

The "***Introduction***" section should be used to define the place of your work (approach, data or analysis) (**up to 1.5-2 pages**). It is understood that there is an unresolved or emerging scientific problem that is being addressed in your paper. In this regard, this section should provide a sufficiently informed (with evenly distributed references to sources) literature review on the state of the indicated problem. Most of the links should be given in this section! At the end of the "**Introduction**" section, **the purpose of the work** is formulated and the **tasks** are indicated, the solution of which will allow achieving the set goal. There is no need to write about a specific result in this section, since there is a corresponding section in the structure of the paper.

METHODS / METHODS OF RESEARCH

Theory (for theoretical works) or **Experimental technique** (for experimental works). One should avoid repetitions, unnecessary details and known provisions, detailed derivations of formulas and equations (give only the final formulas, explaining how it was obtained.

The rationale for the choice of this material (or materials) and methods for describing the material (materials) in this work are given.

If necessary, drawings of samples with units of measurement are given (units of measurement in SI system only). When testing reference materials, reference to the standard is sufficient. For a large test program, it is advisable to use a matrix-type table. If samples are taken from ingots, billets or components, then its orientation and location in the source material are described; standard designations according to the standard are used.

During the tests, the following information is provided: 1. Type and conditions of tests, for example, test temperature, loading rate, environment; 2. Describes the variable parameters, measured values and methods of its measurement with accuracy, degree of error, resolution, etc .; for quantities that have been calculated, the methods used to calculate it.

RESULTS AND ITS DISCUSSION

A section contains a brief description of the experimental and/ or theoretical data obtained. The presentation of the results should consist in identifying the discovered patterns, and not in a mechanical retelling of the contents of tables and graphs. It is recommended to present the results in the past tense. The discussion should contain the interpretation of the research results obtained by **you** (correspondence of the results to the research hypothesis, generalization of the research results, proposals for practical application, proposals for the direction of future research).

The above recommendations are also relevant for theoretical and computational work. In papers based on computational work, you should specify the finite element type, boundary conditions and input parameters. The numerical result is presented taking into account the limitations (accuracy) in the applied computational methods.

In papers based on analytical work, when presenting a long series of formulas, it is necessary to provide an explanatory text so that the essence of the content of the work is clear. The correctness of the calculations should be confirmed by intermediate calculations. As in the case of experimental work, a simple description of numerical or analytical transformations without considering the theoretical (physical) root cause is usually not enough to justify the publication of such a paper. A simple report of numerical results in the form of tables or in the form of text, as well as endless data from experimental work, without trying to determine or hypothesize why such results were obtained, without trying to identify causal relationships, does not decorate the work.

Comparing your numerical results to the numerical results obtained by someone else can be informative. But it doesn't prove anything. Control by comparison with commonly known solutions and verification by comparison with experimental data are mandatory.

Discussion

Use this section to fully explain the significance of your approach, data or analysis and results. This section organizes and interprets the results. The purpose of this section is to show what knowledge has been gained as a result of your work and to show the perspective of the results obtained by comparing it with the current situation in this area described in the "Introduction" section. A large number of graphs and color illustrations do not give a scientific result. It is the responsibility of the author to organize the data and present the results systematically. Thus, simply reporting test results without attempting to investigate internal mechanisms is of little value.

CONCLUSION / CONCLUSIONS

This section usually begins with a few phrases summarizing the work done, and then the main conclusions are presented in the form of a list. Should be concise.

Graphics quality!

We remind you that according to the requirements of the journal, charts and diagrams should be prepared in vector graphic editors. The resolution of the figures is not less than 600 dpi.). Under each figure there should be a corresponding caption (**in Russian and in English!**). The fonts in the figures should be enlarged and brought to uniformity. Dear authors, the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" is a full-color printed edition. If your work contains drawings, it is recommended to make it in color (for clarity).

The tables' headings (as well as the internal content) should be both in Russian and English! (see "Paper Submission guidelines")

Mathematical formulas: complex and multi-line formulas should be typed **entirely in the formula editor Microsoft Equation 3.0!**

References

The list of cited literature includes sources containing materials that the author used when writing the paper, and is drawn up according to the samples below. The composition of literary sources should reflect the state of scientific research in different countries in the problem area under consideration. Links should be available to the scientific community, so the DOI of the publication is desirable. The number of references should be **at least 20** with **more than 50 %** of foreign sources. References in the text are given in square brackets, for example [1] or [2-5]. The numbering of sources should correspond to the order of references to it in the text. Links to extended abstract of dissertation and dissertations are allowed if its available electronic versions are available. References to textbooks, teaching aids, monographs should be of subordinate importance and should not exceed 10–15%, since it is not easily accessible to the general scientific community. Links to unpublished works are not allowed. Self-citation should not exceed **15–17 %**. If the work was published in both Russian and English (or other) languages, then it is better to give a link to the translated work in the References. In connection with the entry of the journal into the citation database of scientific publications, in addition to the traditional list of references (**GOST 7.0.5–2008**), an additional list is required with the translation of Russian-language sources into Roman type and English language. Transliteration is strictly according to the BSI system (see http://ru.translit.net/?account=bsi) or (https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bsi).

If the paper has a DOI, be sure to indicate it! If the book has an ISBN, be sure to include it!

Pay attention to the guidelines for formatting Russian-language sources in the English-language section of the paper (in References).

Dear Authors, the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" has successfully passed the re-registration procedure with ROSCOMNADZOR and, starting from 2021, is switching to the publication of a scientific publication in two languages. The first – printed (basic) – in Russian with an English part; the second – Electronic Publications (pdf) – all the work is completely in English. **After receiving a message about the acceptance of the paper for publication in the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science", the authors should provide a high-quality translation of their paper into English** (machine translation is not allowed!). English version of the work should be formatted according to the template. **Attention!** The English version of the paper should be sent to the journal's mail (metal_working@mail.ru) within 2 weeks!

Editorial board and editorial council of the journal
"Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science"

МАТЕРИАЛЫ СОУЧРЕДИТЕЛЕЙ

Внимание, инженеры и технические специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией, наладкой электроавтоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков, а также студенты и аспиранты профильных специальностей вузов, соучредитель журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)» ООО Научно-производственная коммерческая фирма «МАШСЕРВИСПРИБОР» готова предоставить свои страницы под рубрику «Системы автоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков».

В представляемых для данной рубрики статьях должны быть изложены проблемы и их решения в рамках следующих тем:

– системы ЧПУ;
– станочные электроприводы;
– датчики и элементы станочной электроавтоматики;
– модернизация систем автоматики и электроприводов;
– импортозамещение;
– автоматизация разработки технологических программ для станков с ЧПУ.

Преимуществом публикации будут пользоваться статьи, где отражены разработка и производство отечественных систем и элементов электроавтоматики, а также темы, посвященные импортозамещению. Для авторов статей под указанной выше рубрикой публикация является бесплатной.

Важно! Работа должна поступить не позднее, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях по согласованию с редакцией журнала срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели. Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы Антиплагиат. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %. Объем материалов рубрики в одном выпуске журнала не должен превышать трех печатных страниц журнала (15 000 знаков без пробелов).

Материалы для публикации принимаются ООО Научно-производственной коммерческой фирмой «МАШСЕРВИСПРИБОР» (e-mail: msp@chpu.ru). Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Внимание авторов! Материалы, поступившие от лица ООО Научно-производственной коммерческой фирмы «МАШСЕРВИСПРИБОР», не индексируются в Национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ – метаданные статей не подаются в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU. Кроме того, метаданные указанных материалов соучредителя не отправляются в международные базы Web of Science и Scopus.

Для опубликования материалов в основных рубриках журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)», индексируемых в РИНЦ, Web of Science и Scopus, необходимо следовать правилам оформления и правилам подачи статей, представленных на сайте научного издания https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov .

Напоминаем, что в журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «ОМ» зарегистрирован по следующим научным специальностям: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; Технология машиностроения; Сварка, родственные процессы и технологии; Машины, агрегаты и процессы (по отраслям); Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; Порошковая металлургия и композиционные материалы; Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям); Материаловедение (по отраслям). Издание имеет право опубликовать научные работы только в рамках указанных специальностей!

В связи с тем что журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» принимает оригинальные научные статьи в формате *Full Article*, стандартный формат для завершенных научных исследований, объем основного текста работы должен составлять не менее 18–20 страниц машинописного текста через 1,5 интервала) (учитывается тело статьи, без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 стр. **Научная статья должна иметь структуру *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results And Discussion*)**: • **Введение** (***I****ntroduction*);• **Методы / Методика исследований** (***M****ethods*); • **Результаты** (***R****esults*); • **Обсуждение** (***D****iscussion*);• **Заключение** (*Conclusion*).

Порядок подачи статьи в редакцию представлен на странице: https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/how_to .

Для того чтобы подать статью, **автор (все соавторы)** должен быть зарегистрирован на сайте журнала. Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе *MS Word* и прикрепляется в формате *.doc, *.docx. При оформлении своей работы рекомендуется воспользоваться шаблоном, представленным на сайте журнала:

https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx .

Сканированные лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (цветной режим сканирования, разрешение не менее 600 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg.

По окончании всех работ обязательно нажать кнопку «Отправить в редакцию».

Одновременно со статьей высылается оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается ***авторский лицензионный договор***.

Все рукописи рецензируются. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Соучредители журнала
«ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)»

ISSN 1994-6309 (Print)
ISSN 2541-819X (Online)

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. ***Публикация статей бесплатная.***

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: **«Технология»**, **«Оборудование»**, **«Инструменты»**, **«Материаловедение»**, **«Научно-техническая информация»** и др.

Журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» индексируется в крупнейших в мире реферативно-библиографических и наукометрических базах данных *Web of Science* и *Scopus*.

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ

+7 (383) 346-17-75

metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-80400 от 01 марта 2021 г.
Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X
Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590

НОВОСИБИРСК

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 25 Number 1 JANUARY – MARCH 2023

OBRABOTKA METALLOV

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

NOVOSIBIRSK