

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 26 Номер 4

ОКТАБРЬ – ДЕКАБРЬ 2024

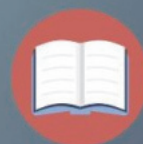
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science



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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 26 № 4 2024 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: **Чувиллин 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, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, КузГТУ, г. Кемерово, **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, ИФТПС СО РАН, г. Якутск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары



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

WEB OF SCIENCE



EBSCO

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

Иванцовский 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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. 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_metallor

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

Цена свободная

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.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Маниканта Д.Э., Амбхор Н., Шамкувар С., Гураджала Н.К., Дакарапу С.Р. Исследование влияния гибридных наножидкостей на растительной основе на производительность обработки при токарной обработке с минимальным количеством СОЖ.....	6
Дама Й.Б., Джоги Б.Ф., Паведе Р., Кулкарни А.П. Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава.....	19
Гриненко А.В., Чумаевский А.В., Сидоров Е.А., Утяганова В.Р., Амиров А.И., Колубаев Е.А. Искажение геометрии, окисление кромки, структурные изменения и морфология поверхности реза листового проката толщиной 100 мм из алюминиевых, медных и титановых сплавов при плазменной резке на токе обратной полярности.....	41
Соматкар А., Дживеди Р., Чинчаникар С. Сравнительная оценка накатывания роликом сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости.....	57
Карлина Ю.И., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки.....	75

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Систематика многоинструментных наладок на станках токарной группы.....	92
Тошов Дж.Б., Фозилов Д.М., Елемесов К.К., Рузиев У.Н., Абдуллаев Д.Н., Басканбаева Д.Д., Бекирова Л.Р. Повышение стойкости зубьев буровых долот за счет изменения технологии их изготовления.....	112
Поспелов И.Д. Исследование распределения нормальных контактных напряжений в очагах деформации при горячей прокатке полос из конструкционных низколегированных сталей для повышения стойкости рабочих валков.....	125
Абляз Т.Р., Блохин В.Б., Шлыков Е.С., Муратов К.Р., Осинников И.В. Изготовление электродов-инструментов с оптимизированной конфигурацией для копировально-прошивной электроэрозионной обработки методом быстрого прототипирования.....	138

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Обзор исследований высокоэнтропийных сплавов, их свойств, методов создания и применения.....	153
Сюсюка Е.Н., Аминев Е.Х., Кабиров Ю.В., Пруцакова Н.В. Анализ изменения микроструктуры компрессионных колец вспомогательного судового двигателя.....	180
Дударева А.А., Бушуева Е.Г., Тюрин А.Г., Домаров Е.В., Насенник И.Е., Шикалов В.С., Скороход К.А., Легкодымов А.А. Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства поверхностно модифицированных слоев после вневауумной электронно-лучевой наплавки на сталь 12X18H9T с применением порошковой смеси состава 10Cr-30V.....	192
Болтрушевич А.Е., Мартюшев Н.В., Козлов В.Н., Кузнецова Ю.С. Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча.....	206
Саблина Т.Ю., Панченко М.Ю., Зятиков И.А., Пучикин А.В., Коновалов И.Н., Панченко Ю.Н. Исследование гидрофильности поверхности металлических материалов, модифицированных ультрафиолетовым лазерным излучением.....	218

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ	234
---------------------------	-----

МАТЕРИАЛЫ СОУЧЕРЕДИТЕЛЕЙ	243
---------------------------------	-----

Корректор *Е.Е. Татарникова*
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 05.12.2024. Выход в свет 16.12.2024. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 30,5. Уч.-изд. л. 56,73. Изд. № 165. Заказ 231. Тираж 300 экз.

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 26 No.4 2024 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. Skeebe, 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 “VNIINSTRUMENT”, *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. Korotkov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Kuzbass State Technical University, *Kemerovo*;

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,
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems
of the North of the Siberian Branch of the RAS, *Yakutsk*;

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

Manikanta J.E., Ambhore N., Shamkuwar S., Gurajala N.K., Dakarapu S.R. Investigation of vegetable-based hybrid nanofluids on machining performance in MQL turning.....	6
Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R., Kulkarni A.P. Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: Study for hip-joint implant.....	19
Grinenko A.V., Chumaevsky A.V., Sidorov E.A., Utyaganova V.R., Amirov A.I., Kolubaev E.A. Geometry distortion, edge oxidation, structural changes and cut surface morphology of 100mm thick sheet product made of aluminum, copper and titanium alloys during reverse polarity plasma cutting.....	41
Somatkar A., Dwivedi R., Chinchani S. Comparative evaluation of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry and nanofluid minimum quantity lubrication conditions.....	57
Karlina Yu.I., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Assessment of the quality and mechanical properties of metal layers from low-carbon steel obtained by the WAAM method with the use of additional using additional mechanical and ultrasonic processing.....	75

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Yusubov N.D., Abbasova H.M. Systematics of multi-tool setup on lathe group machines.....	92
Toshov J.B., Fozilov D.M., Yelemessov K.K., Ruziev U.N., Abdullayev D.N., Baskanbayeva D.D., Bekirova L.R. Increasing the durability of drill bit teeth by changing its manufacturing technology.....	112
Pospelov I.D. Investigation of the distribution of normal contact stresses in deformation zone during hot rolling of strips made of structural low-alloy steels to increase the resistance of working rolls.....	125
Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Shlykov E.S., Muratov K.R., Osinnikov I.V. Manufacturing of tool electrodes with optimized configuration for copy-piercing electrical discharge machining by rapid prototyping method.....	138

MATERIAL SCIENCE

Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.A. A review of research on high-entropy alloys, its properties, methods of creation and application.....	153
Syusyuka E.N., Amineva E.H., Kabirov Yu.V., Prutsakova N.V. Analysis of changes in the microstructure of compression rings of an auxiliary marine engine.....	180
Dudareva A.A., Bushueva E.G., Tyurin A.G., Domarov E.V., Nasennik I.E., Shikalov V.S., Skorokhod K.A., Legkodymov A.A. The effect of hot plastic deformation on the structure and properties of surface-modified layers after non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of composition 10Cr-30B on steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti.....	192
Boltrushevich A.E., Martyshev N.V., Kozlov V.N., Kuznetsova Yu.S. Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing.....	206
Sablina T.Y., Panchenko M.Yu., Zyatikov I.A., Puchikin A.V., Konovalov I.N., Panchenko Yu.N. Study of surface hydrophilicity of metallic materials modified by ultraviolet laser radiation.....	218

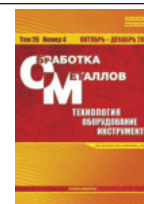
EDITORIAL MATERIALS	234
----------------------------	-----

FOUNDERS MATERIALS	243
---------------------------	-----



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование влияния гибридных наножидкостей на растительной основе на производительность обработки при токарной обработке с минимальным количеством СОЖ

Джаввади Эшвара Маниканта^{1,а}, Нитин Амбхор^{2,б,*}, Сонал Шамкувар^{3,с},
Навин Кумар Гураджала^{4,д}, Санта Рао Дакарпу^{5,е}

¹ Женский инженерный колледж Шри Вишну (А), Бхимаварам, Андхра-Прадеш, 534202, Индия

² Технологический институт Вишвакармы, Махараштра, Пуна 411037, Индия

³ Институт информационных технологий Вишвакармы, Махараштра, Пуна – 411048, Индия

⁴ Инженерно-технологический колледж CMR, Хайдарабад, Телангана, 501401, Индия

⁵ Вишакский инженерно-технологический институт, Нарава, Вишакхапатнам, 530027, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-0881-4899>,  manijem66@gmail.com; ^б  <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>,  nitin.ambhore@viit.ac.in;

^с  <https://orcid.org/0000-0001-7633-0813>,  sonal.shamkuwar@viit.ac.in; ^д  <https://orcid.org/0000-0003-0829-7622>,  naveenkumargurrijala84@gmail.com;

^е  <https://orcid.org/0000-0001-7679-7448>,  dsantharao@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.895

История статьи:

Поступила: 07 августа 2024

Рецензирование: 21 августа 2024

Принята к печати: 17 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Наножидкость

Смазывание

Эффективность механической обработки

Токарная обработка

АННОТАЦИЯ

Введение. Гибридные наножидкости на растительной основе приобретают все большее значение в контексте токарной обработки с минимальным количеством СОЖ (MQL) в связи с их улучшенными смазочными свойствами и экологическими преимуществами. Эти наножидкости, в состав которых обычно входят растительные масла и наночастицы, такие как графит или диоксид титана, повышают производительность обработки за счет снижения трения и сил резания, что приводит к повышению качества обработанной поверхности и срока службы инструмента. **Цель работы.** Твердосплавные инструменты с покрытием широко используются для обработки нержавеющей стали марки SS 304 благодаря их износостойкости и способности выдерживать высокие температуры. Целью данной работы является оценка эффективности обработки при точении стали марки SS 304 при различных концентрациях гибридных наножидкостей. **Методы исследования.** В этом исследовании предпринята попытка использования гибридных наночастиц оксида меди / оксида алюминия ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$), смешанных с кукурузным маслом. В общей сложности было разработано шесть гибридных смазочно-охлаждающих жидкостей объемом 100 мл с различной массовой концентрацией (0,4 %, 0,8 %, 1,2 %, 1,6 %, 2 %, 2,4 %), и были исследованы их характеристики при работе со сталью SS 304. **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что при увеличении массовой концентрации теплофизические свойства улучшаются. Кроме того, показано, что трение уменьшается при увеличении концентрации частиц до 1,6 масс. %. При концентрации 1,6 масс. % гибридная наноСОЖ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ показала лучшие эксплуатационные характеристики. В этом исследовании также приводится сравнение с сухим точением. Наибольший износ инструмента наблюдается при сухом точении, за ним следует точение с использованием кукурузного масла. Наблюдается снижение усилия резания на 32 %. Шероховатость поверхности при использовании гибридной наноСОЖ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ снижается на 27,7 %. Однако при использовании гибридной наножидкости (2,4 %) наблюдается низкий износ инструмента. В данном исследовании рассматривается возможность использования гибридных наножидкостей на растительной основе при токарной обработке с минимальным количеством СОЖ.

Для цитирования: Исследование влияния гибридных наножидкостей на растительной основе на производительность обработки при токарной обработке с минимальным количеством СОЖ / Д.Э. Маниканта, Н. Амбхор, С. Шамкувар, Н.К. Гураджала, С.Р. Дакарпу // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 6–18. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-6-18.

*Адрес для переписки

Амбхор Нитин, к.т.н., доцент

Технологический институт Вишвакармы,

Пуна 411037, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950441, e-mail: nitin.ambhore@viit.ac.in

Введение

При механической обработке в зоне резания выделяется большое количество тепла и возникает трение, что снижает производительность [1]. Поэтому требуются эффективные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) и способы ввода смазки между трущимися поверхностями. Смазочно-охлаждающие жидкости помогают поддерживать низкую температуру в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью [2, 3]. В какой-то степени традиционные методы охлаждения и смазочно-охлаждающие жидкости служат этой цели, но интенсивное использование обычных СОЖ приводит к загрязнению окружающей среды, а также они токсичны для человека [4]. Сухая механическая обработка является альтернативой традиционному охлаждению для обеспечения чистоты операций резки металла без каких-либо проблем с окружающей средой и здоровьем работников [5–7]. Некоторые исследователи проводили резку металла в сухих условиях и обнаружили положительные результаты в отношении производительности обработки. Однако в большинстве случаев сухая обработка с большой глубиной резания и высокими скоростями не может быть предпочтительным методом, поскольку обработка в таких условиях снижает срок службы инструмента [8–9]. С учетом вышесказанного потенциальный метод токарной обработки с минимальным количеством СОЖ (MQL) направлен на снижение расхода смазочно-охлаждающей жидкости. При этом способе в зону обработки подается небольшое количество смазочно-охлаждающей жидкости. Как правило, базовые жидкости обладают хорошими смазывающими свойствами, но низкая охлаждающая способность ограничивает их использование при высокоскоростных операциях резания с использованием MQL. В настоящее время наноразмерные частицы комбинируются с традиционными жидкостями для повышения производительности [10–13].

Сонг и др. [14] добавили в обычную СОЖ многослойные углеродные нанотрубки и обнаружили улучшение теплопроводности на 200 %. Услер и др. [15] исследовали влияние гибридной наножиidкости при MQL-точении. Результаты показали, что наиболее существенное влияние на силу резания и силу осевого давления оказы-

вала скорость подачи (86,8 и 65 % соответственно), а наибольшее влияние на температуру резания оказывали условия резания (93,2 %). Сенкан и др. [16] добавили наночастицы диоксида кремния (SiO_2) в подсолнечное масло и использовали получившуюся гибридную наноСОЖ при токарной обработке стали AISI 304. Результаты показали, что шероховатость поверхности сильно зависит от скорости подачи. Метод охлаждения оказал существенное влияние на температуру в зоне резания и износ инструмента.

Нгок и др. [17] исследовали эффективность гибридной наножиidкости $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2$ и мононаножиidкостей Al_2O_3 и MoS_2 при точении закаленных деталей из стали 90CrSi в условиях MQL. Результаты показали, что наблюдалась более низкая температура резания, а шероховатость поверхности и сила резания были меньше. Джунанкар и др. [18] исследовали влияние наножиidкости на основе растительного масла на токарную обработку подшипниковой стали в условиях MQL. Гибридная наножиidкость снижала шероховатость поверхности и температуру в зоне резания на 65 и 11 % соответственно.

Ибрагим и др. [19] исследовали влияние масла из рисовых отрубей на производительность обработки при точении стали AISI D3. Результаты экспериментов показали, что усилие резания снизилось на 18,48 %, износ инструмента – на 51,96 %, а шероховатость обработанной поверхности – на 12,84 %. Нгол [20] оценил эффективность механической обработки при точении стали 90CrSi в условиях MQL, добавляя наночастицы Al_2O_3 и MoS_2 в базовое жидкое соевое масло и эмульсию. Результаты показали, что точение в условиях MQL с наножиidкостью, изготовленной из MoS_2 , эмульсии и сои, могло значительно снизить силу резания.

Пасам и Неелам [21] изучали эффективность токарной обработки титановых сплавов с использованием гибридных смазочно-охлаждающих жидкостей на основе растительного масла. Разработанные СОЖ снижали силу и температуру резания, повышали микротвердость обрабатываемой поверхности и благоприятные остаточные напряжения. Усца [22] изучал эффективность механической обработки материала Dillimax 690T с использованием наножиidкости на основе нанокристаллов целлюлозы в условиях MQL. Согласно результатам испытаний, на-

блюдались значительные температура резания, шероховатость поверхности, износ инструмента и энергозатраты.

Сингх и др. [23] исследовали влияние концентрации наночастиц на токарную обработку хастеллоя C-276 в условиях MQL. Исследование показало, что более высокая концентрация наночастиц улучшила теплопроводность на 12,28 %, шероховатость поверхности – на 27,88 %, температуру – на 16,8 % и износ инструмента – на 22,5 %. Дас и др. [24] оценили эффективность обработки при точении стали AISI 4340 с использованием четырех различных составов наножидкостей в условиях MQL. Авторы обнаружили, что наножидкости CuO оказывают превосходное влияние на силу резания и износ инструмента. Бай и др. [25] оценили эффективность измельчения наножидкостей на основе Al_2O_3 и хлопкового масла в условиях MQL. Результаты показали, что шероховатость поверхности составляет 1,63 мкм при концентрации Al_2O_3 в хлопковом масле 0,5 масс. %.

Ученые пытались исследовать производительность обработки с использованием различных растительных масел, таких как подсолнечное, соевое и хлопковое. Однако производительность обработки с использованием кукурузного масла не была изучена. Целью этого исследования является использование гибридных наночастиц оксида меди и оксида алюминия (CuO/Al_2O_3) в сочетании с кукурузным маслом. В работе также исследовались теплофизические, антифрикционные и противоизносные свойства гибридных наножидкостей в различных концентрациях и их влияние на обработку стали SS 304.

Методы

Вначале приготовили смазочно-охлаждающую жидкость с использованием наночастиц CuO и Al_2O_3 диаметром 30 нм, поставляемых компанией Platonix Nanotech в Джаркханде, Индия. При смешивании кукурузного масла с наночастицами CuO и Al_2O_3 использовали соотношение 1:1,5. Для повышения стабильности в базовое масло добавили поверхностно-активное вещество додецилбензолсульфонат натрия (10 % наночастиц). Путем изменения массовой концентрации гибридных наночастиц в жидкости было создано в общей сложности шесть

гибридных СОЖ объемом 100 мл (0,4 %, 0,8 %, 1,2 %, 1,6 %, 2 % и 2,4 %). Однородную смесь получали путем перемешивания магнитной мешалкой в течение одного часа и ультразвуком в течение двух часов. Стабильность гибридной наножидкости оценивали с использованием традиционных методов осаждения. Все образцы гибридной наноСОЖ (HCF) были собраны в мерные банки объемом 10 мл и выдержаны в замороженном виде в течение 72 часов перед использованием. Удельная теплоемкость и теплопроводность были измерены с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии и анализатора Pro thermal соответственно. Для измерения вязкости разработанной наножидкости использовался реометр (производитель Anton Paar). Были проведены три независимых испытания, результаты которых были усреднены для определения вязкости. Для изучения трибологических свойств HCF проведены испытания методом «штифт – диск».

В кукурузном масле были исследованы различные массовые концентрации CuO/Al_2O_3 . Предпочтение отдано кукурузному маслу в качестве основы для приготовления наножидкостей из-за его доступности, экономичности и желаемых тепловых свойств. Кукурузное масло – это обычное растительное масло с хорошей термостабильностью и умеренной вязкостью, что делает его пригодным для диспергирования наночастиц и улучшения свойств теплопередачи в наножидкостях. В соответствии со стандартом ASTM G 99 во время испытания на трение были разрешены максимальные нагрузка 200 Н и скорость вращения 2000 об/мин. Для определения коэффициента трения с использованием схемы «штифт – диск» необходимо приложить штифт к вращающемуся диску в контролируемых условиях, чтобы измерить сопротивление трения между двумя поверхностями. Подход, использованный в этом исследовании, показан на рис. 1.

Для проведения экспериментов по токарной обработке использовали центровой токарный станок (Turn-master-35), показанный на рис. 2, со скоростью подачи приготовленных СОЖ (CuO/Al_2O_3) 10 мл/с. Заготовку из сплава SS 304 длиной 200 мм и диаметром 50 мм обрабатывали с помощью инструмента SNMG120408 NSU (твердосплавный с покрытием). Параметры

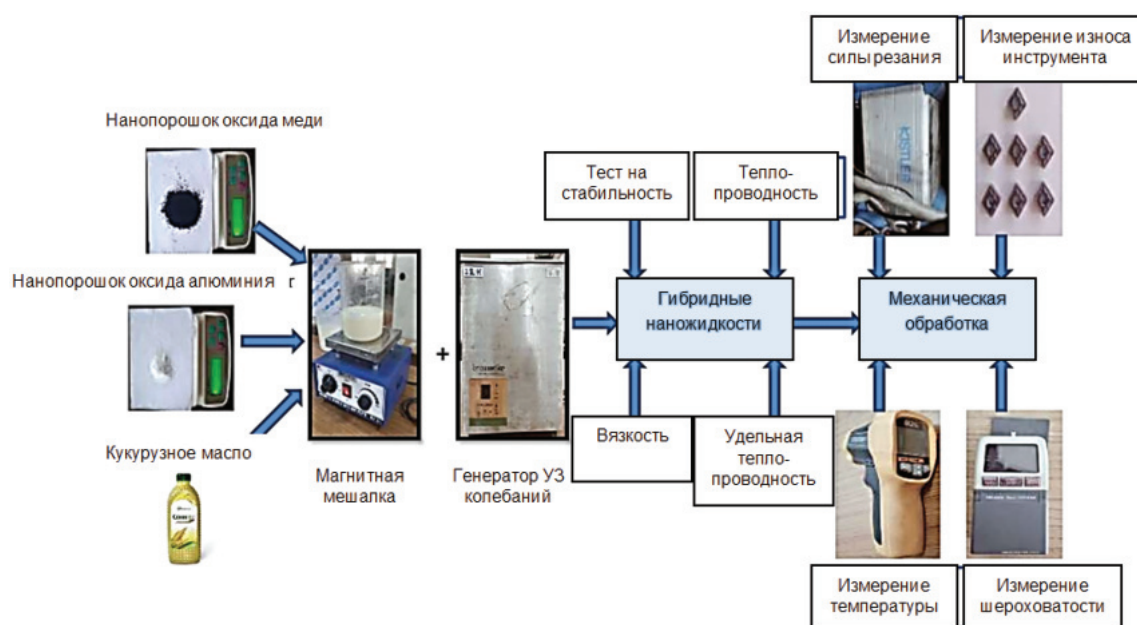


Рис. 1. Методология эксперимента

Fig. 1. Experimental methodology

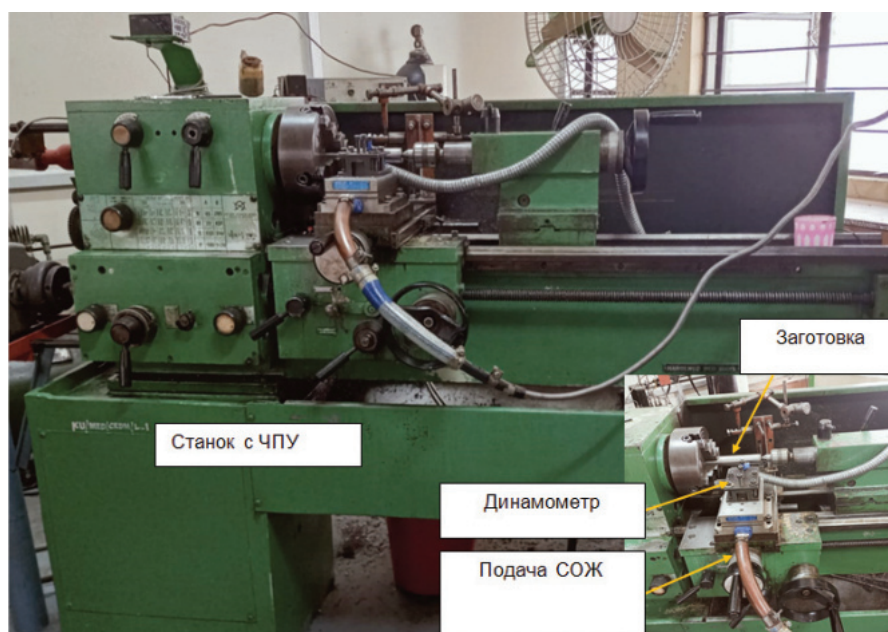


Рис. 2. Экспериментальная установка токарной обработки с минимальным количеством СОЖ

Fig. 2. Experimental setup for turning with MQL

резания были выбраны в соответствии с рекомендациями производителя для данного инструмента и заготовки. Подробная информация об экспериментальной установке приведена в табл. 1. Скорость резания, подача и глубина резания составляли соответственно 1000 об/мин, 90 мм/об, 0,15 мм; при обработке их поддерживали постоянными. В процессе токарной об-

работки силу резания, температуру на острие инструмента и чистоту обрабатываемой детали измеряли с помощью пьезоэлектрического динамометра, цифрового пирометра и прибора для определения шероховатости поверхности соответственно. Износ торца инструмента измеряли с помощью оптического микроскопа. В табл. 2 приведены параметры процесса и среда MQL.

Таблица 1

Table 1

Подробная информация об экспериментальной установке

Details of experimental setup

Параметр	Описание
Металлорежущий станок	Центровой токарный станок Turn-master-35 (изготовитель Kirloskar)
Материал заготовки	Сталь SS 304
Размер заготовки	Диаметр 50 мм, длина 200 мм
Патрон	PSBNR 2525M-12
Режущий инструмент	SNMG 120408 NSU (твердосплавный с покрытием)

Таблица 2

Table 2

Параметры процесса и среда MQL

Process parameters and MQL environment

Скорость (об/мин)	1000
Подача (мм/мин)	90
Глубина резания (мм)	0,3
Базовое масло	Кукурузное масло
ПАВ	SDBS
Концентрация ПАВ	10 (вес. % от наночастиц)
Наночастицы	Оксид меди/оксид алюминия ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$)
Гибридное соотношение	1:1,5
Массовая концентрация (%)	0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2; 2,4
СОЖ	Скорость подачи СОЖ (MQL) 10мл/сек
Измерение температуры	Цифровой пирометр
Измерение силы резания	Пьезоэлектрический динамометр Kistler 9257B
Измерение износа инструмента	Оптический микроскоп

Результаты и обсуждение

В этом исследовании путем визуального наблюдения была исследована стабильность гибридных наножидкостей $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на основе кукурузного масла. После 96 часов подготовки образцов было замечено, что гибридные наножидкости $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в соотношении 1:1,5 были наиболее стабильны при массовой доле 0,4 и 1,6. Увеличение концентрации привело к усилению агрегации, а следовательно, к снижению стабильности. Результаты испытания на стабильность гибридных наножидкостей $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на основе кукурузного масла для различных весовых концентраций представлены на рис. 3.

На рис. 4, а показаны результаты определения вязкости при использовании различных концентраций гибридных наножидкостей $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Вязкость можно повысить, используя гибридные наночастицы помимо базового масла с концентрацией частиц 0,4–2,4 масс. %. Гибридная наножидкость $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ становится более вязкой в результате увеличения концентрации частиц в жидкости. Вязкость раствора снижается с повышением температуры. В результате снижения межмолекулярного сцепления между частицами при более высоких температурах вязкость становится менее значительной.

На рис. 4, б показано влияние температуры на теплопроводность. На рис. 4, б также пока-

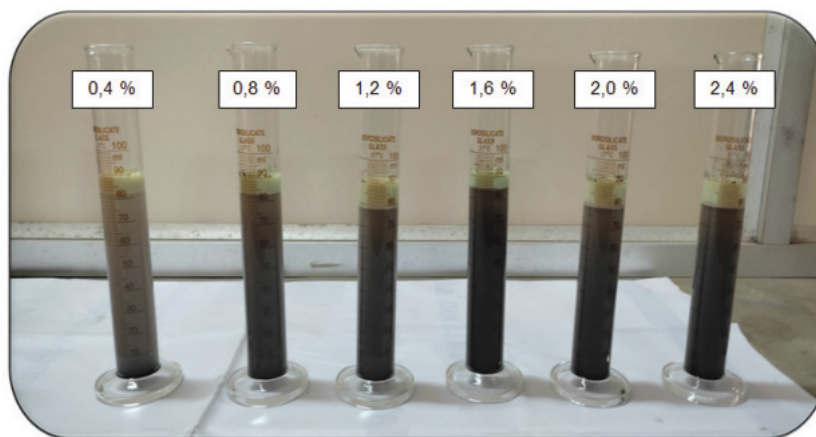


Рис. 3. Результаты 96-часового седиментационного эксперимента

Fig. 3. Results of a 96-hour sedimentation test

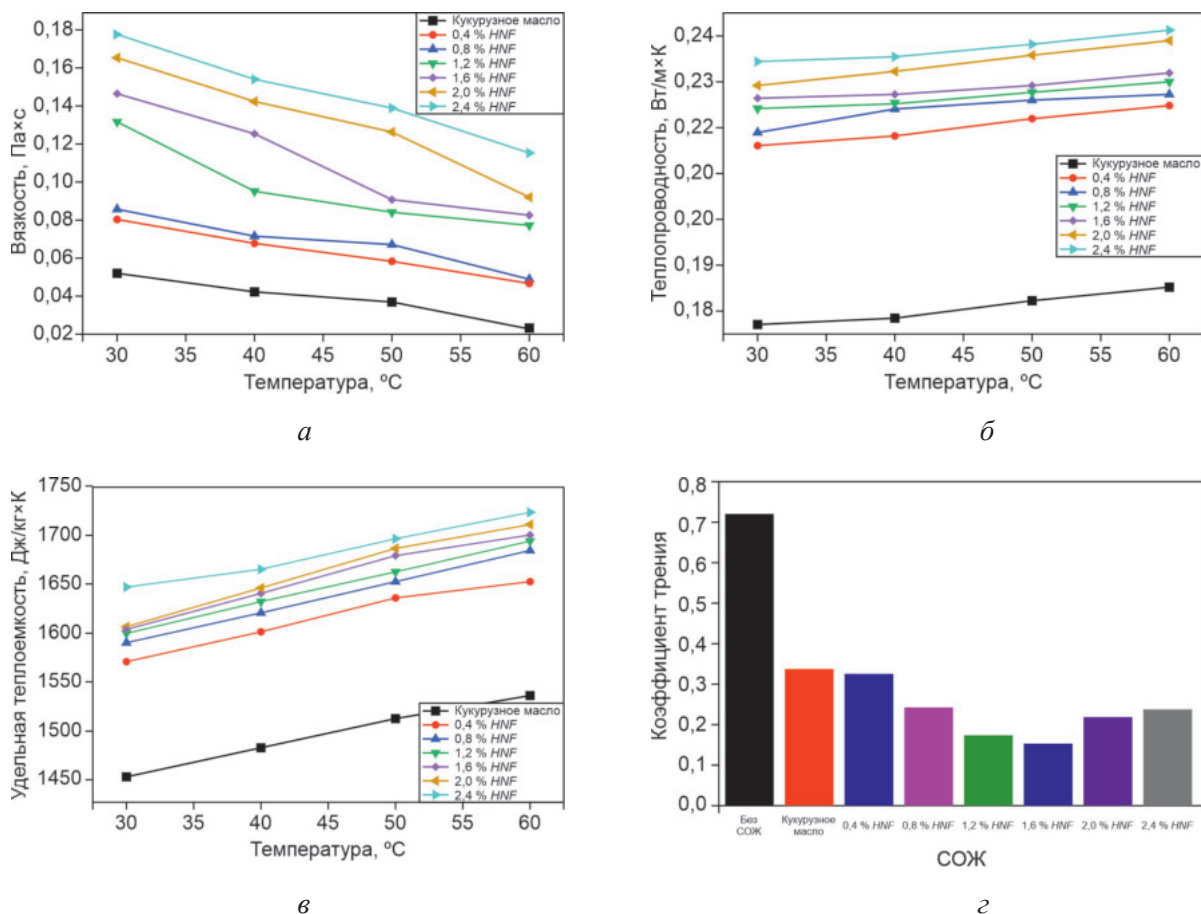


Рис. 4. Вязкость (а); теплопроводность (б); удельная теплоемкость (в); коэффициент трения (г)

Fig. 4. Viscosity (а); thermal conductivity (б); specific heat (в); coefficient of friction (г)

зано, что теплопроводность материала улучшилась благодаря добавлению наночастиц за счет броуновского движения и огромной площади поверхности наножидкостей.

На рис. 4, в показано, что экспериментальные значения удельной теплоемкости $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

HCF увеличиваются при повышении концентрации частиц (в процентах по массе). Удельная теплоемкость увеличивается при повышении концентрации наночастиц и температуры. При концентрации наночастиц 2,4 масс. % удельная теплоемкость гибридной смазочно-охлажда-

ющей жидкости $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на 11,86 % выше, чем у базового масла. Возможно, это объясняется высокой стабильностью НСФ. Теплопроводность и удельная теплоемкость НСФ были улучшены, что позволяет им более эффективно отводить тепло. Трибологические свойства гибридных наножидкостей можно оценить, используя схему трения «штифт – диск». Благодаря смешиванию гибридных наночастиц оксида меди и оксида алюминия с кукурузным маслом между штифтом и диском образуется тонкая трибопленка. Толщина пленки и полученный результат становятся больше при увеличении количества наночастиц до определенного соотношения.

На рис. 4, *з* показана закономерность уменьшения коэффициента трения до 1,6 масс. %, а затем наблюдается закономерность увеличения коэффициента трения после 1,6 масс. %. После увеличения до 1,6 масс. % коэффициент трения пропорционален содержанию наночастиц, это свидетельствует о том, что смазочные свойства разработанной смазочно-охлаждающей жидкости в конечном итоге снижаются. Причиной является скопление наночастиц, наблюдаемое в результате осаждения. Минимальный коэффициент трения, равный 0,124, наблюдается при содержании 1,6 масс. % гибридных наножидкостей CuO и Al_2O_3 .

В условиях непрерывного резания электрический динамометр с пьезодатчиком, установленный на токарном станке, измерял силу резания в режиме реального времени. Измеренные силы резания показаны на рис. 5, *а* для различных условий смазки. Стабильно низкие концентрации частиц снижают все силы, в то время как более высокие концентрации лишь незначительно увеличивают их.

При повышении концентрации наночастиц образуется плотный слой или взвесь, что увеличивает усилие резания. При содержании $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в 1,6 масс. % сила резания снижается на 32 %. Это происходит за счет образования адгезивного покрытия между поверхностями скольжения благодаря слоистой наноразмерной структуре Al_2O_3 , которая также делает металлические поверхности более легко поглощающими. Это видно по коэффициенту трения на рис. 4, *з*. НСФ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ также имеет более высокую вязкость, чем базовая жидкость. Толстая пленка, которая

образуется во время резки, в конечном итоге снижает давление резания на контактирующих поверхностях.

На температуру резания может влиять тепло, выделяющееся на границе раздела стружка-инструмент. Для определения температуры НСФ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ использовали цифровой пирометр. На рис. 5, *б* показаны различные условия смазки, оказывающие влияние на температуру резания. Температура резания была значительно снижена при использовании гибридной наножидкости $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Снижение температуры резания может быть достигнуто при концентрации оксидов меди и алюминия до 2,4 %. По сравнению с другими концентрациями образец, содержащий 1,6 масс. % $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, имеет самую низкую температуру резания (67 °С). Гибридная наноСОЖ с содержанием $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 1,6 масс. % снижает температуру резания на 43,4 % по сравнению с традиционной смазочно-охлаждающей жидкостью. Используя эту НСФ, можно повысить теплопроводность и коэффициент теплопередачи наноСОЖ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ для снижения температуры в зоне резания.

Эффективность смазочно-охлаждающих жидкостей определяется их способностью снижать шероховатость поверхности заготовки. На рис. 5, *в* показана измеренная шероховатость поверхности. С увеличением концентрации наночастиц значение шероховатости (R_a) уменьшается с 5,4 до 1,6 %, а затем увеличивается по мере увеличения концентрации. Это может быть результатом агрегации наночастиц. Шероховатость поверхности (R_a) при использовании НСФ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ снижается на 27,7 и 23,8 % соответственно по сравнению с сухим резанием и резанием при использовании базового масла в качестве СОЖ. Из-за минимального сопротивления сдвигу между инструментом и обрабатываемой деталью, обусловленного сродством инструмента к металлическим поверхностям, трение между ними сведено к минимуму.

Измерение износа по задней поверхности резца помогает прогнозировать оставшийся срок службы режущего инструмента. Измеряя износ по задней поверхности резца, операторы могут отслеживать состояние инструмента в режиме реального времени. Можно увеличить срок службы инструмента, уменьшив его износ. На рис. 5, *б* показано исследование износа ин-

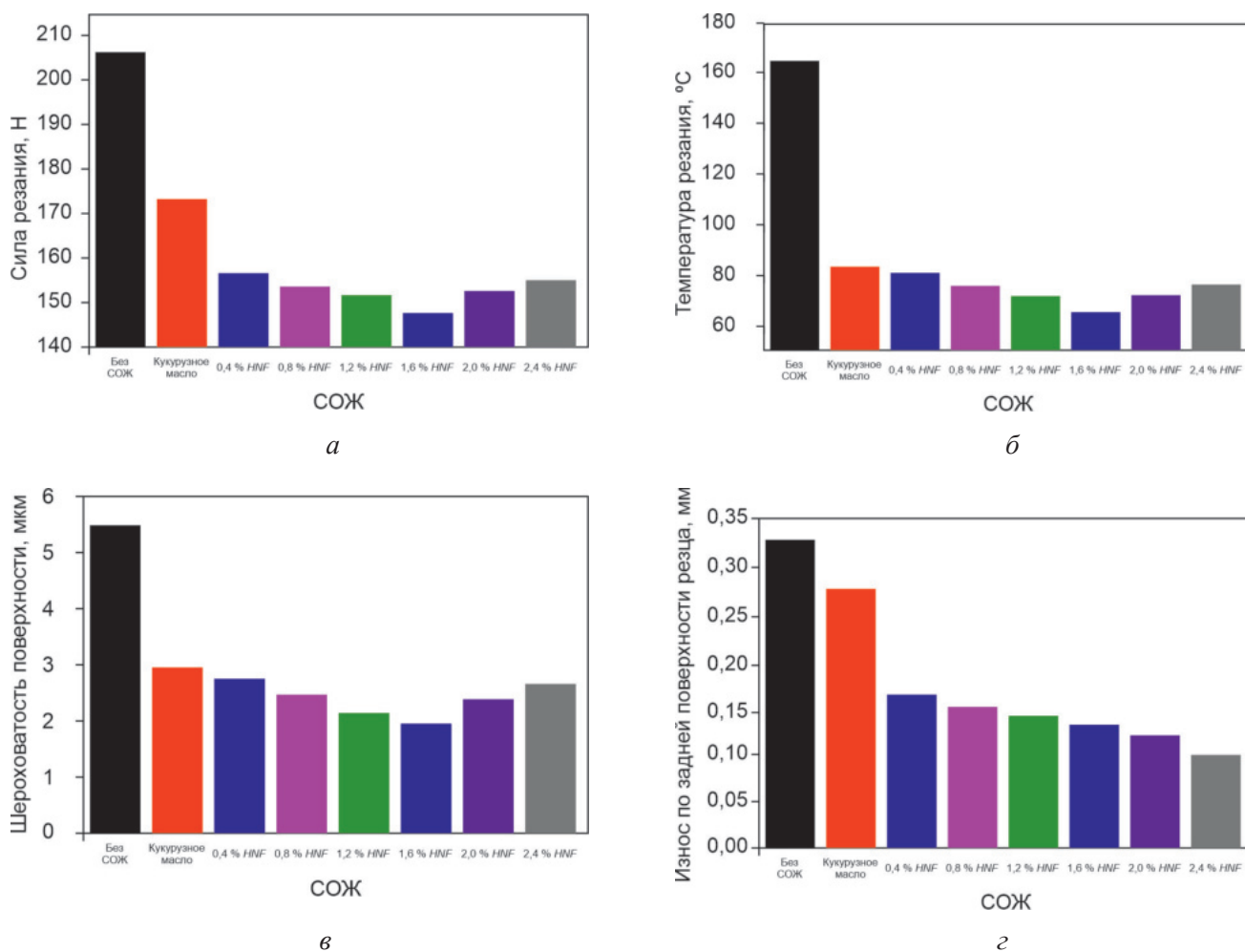


Рис. 5. Влияние состава наноСОЖ на силу резания (а); температуру резания (б); шероховатость поверхности (в); износ по задней поверхности резца (г)

Fig. 5. The effect of the composition of the coating on cutting force (a); cutting temperature (б); surface roughness (в); tool flank wear (г)

струмента при различных условиях смазки. На рис. 6, а, б показан износ инструмента при 2%-й гибридной наножидкости и 0,8%-й гибридной наножидкости соответственно. Благодаря использованию кукурузного масла с более высоким содержанием $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, чем в базовом масле, значительно снижается износ рабочей поверхности инструмента. Меньшее трение означает меньшее нагревание и меньший износ инструмента, что является положительным моментом. В результате между обрабатываемой деталью и инструментом образуется очень тонкий слой. В качестве альтернативы снижение износа рабочей поверхности инструмента может быть обусловлено синергетическим сочетанием шарикоподшипниковых свойств наночастиц CuO и Al_2O_3 .

Закключение

В этом исследовании наножидкости на основе кукурузного масла с добавлением $\text{CuO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ в различных концентрациях были получены и протестированы на эффективность токарной обработки. Были исследованы сила резания, шероховатость поверхности и износ инструмента. Результаты показывают, что использование гибридных наножидкостей в условиях MQL может улучшить производительность обработки стали SS 304. Во всех испытаниях HCF $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с массовой долей 0,4 и 1,6 % показали незначительное осаждение. Такие свойства смазочно-охлаждающей жидкости с добавлением $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, как удельная теплоемкость, вязкость и теплопроводность, улучшаются за счет увеличения концентрации частиц и температуры. Раз-



а



б

Рис. 6. Износ инструмента при использовании 2%-й гибридной наножидкости (а); износ инструмента при использовании 0,8%-й гибридной наножидкости (б)

Fig. 6. Tool wear when using 2 % hybrid nanofluid (a); tool wear when using 0.8 % hybrid nanofluid (б)

рабочая смазочно-охлаждающая жидкость снижает коэффициент трения по сравнению с сухим точением и использованием в качестве СОЖ базового масла в концентрации 1,6 масс. %. Наибольший износ инструмента наблюдается при сухом точении, за ним следует точение с использованием кукурузного масла. При концентрации 1,6 масс. % гибридная наноСОЖ $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ снижает усилие резания, температуру и улучшает качество поверхности. При использовании гибридной наножидкости с содержанием наножидкости 2,4 % по массе наблюдается низкий износ инструмента.

Список литературы

1. Performance investigations for sustainability assessment of Hastelloy C-276 under different machining environments / G. Singh, V. Aggarwal, S. Singh, B. Singh, S. Sharma, J. Singh, C. Li, G. Królczyk, A. Kumar, S.M. Eldin // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9 (3). – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13933.
2. Bedi S.S., Behera G.C., Datta S. Effects of cutting speed on MQL machining performance of AISI 304 stainless steel using uncoated carbide insert: application potential of coconut oil and rice bran oil as cutting fluids // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 45. – P. 8877–8893. – DOI: 10.1007/s13369-020-04554-y.
3. Machining performance on SS304 using nontoxic, biodegradable vegetable-based cutting fluids / J.E. Eswara, B.N. Raju, C. Prasad, B.S.S.P. Sankar // *Chemical Data Collections*. – 2022. – Vol. 42. – DOI: 10.1016/j.cdc.2022.100961.
4. Ambhore N., Kamble D., Agrawal D. Experimental investigation of induced tool vibration in turning of hardened AISI52100 steel // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2022. – Vol. 10. – P. 1679–1689. – DOI: 10.1007/s42417-022-00473-4.
5. Roles of new bio-based nanolubricants towards eco-friendly and improved machinability of Inconel 718 alloys / M.A.M. Ali, A.I. Azmi, M.N. Murad, M.Z.M. Zain, A.N.M. Khalil, N.A. Shuaib // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 144. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106106.
6. Singh G., Aggarwal V., Singh S. Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 271. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122185.
7. Kumar M.S., Krishna V.M. An investigation on turning AISI 1018 steel with hybrid biodegradable nanofluid/MQL incorporated with combinations of $\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 24. – P. 1577–1584. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.478.
8. Zhang S., Li J.F., Wang Y.W. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions // *Journal of Cleaner Production*. – 2012. – Vol. 32. – P. 81–87. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.014.
9. Rajaguru J., Arunachalam N. A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 276. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116417.
10. Tefera A.G., Sinha D.K., Gupta G. Experimental investigation and optimization of cutting parameters



during dry turning process of copper alloy // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2023. – Vol. 70 (1). – P. 145. – DOI: 10.1186/s44147-023-00314-5.

11. Nune M.M.R., Chaganti P.K. Development, characterization, and evaluation of novel eco-friendly metal working fluid // *Measurement*. – 2019. – Vol. 137. – P. 401–416. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.066.

12. Optimizing sustainable machining processes: a comparative study of multi-objective optimization techniques for minimum quantity lubrication with natural material derivatives in turning SS304 / J.E. Manikanta, B.N. Raju, N. Ambhore, S. Santosh // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. – 2024. – Vol. 18 (2). – P. 789–800. – DOI: 10.1007/s12008-023-01706-w.

13. Heat transfer efficiency of Al_2O_3 -MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: an experimental and theoretical investigation / A. Asadi, M. Asadi, A. Rezaniakolaei, L.A. Rosendahl, M. Afrand, S. Wongwises // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 117. – P. 474–486. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.036.

14. Surface integrity optimization of high speed dry milling UD-CF/PEEK based on specific cutting energy distribution mechanisms effected by impact and size effect / Y. Song, H. Cao, D. Qu, H. Yi, X. Kang, X. Huang, J. Zhou, C. Yan // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 79. – P. 731–744. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.05.024.

15. Investigation on the effect of hybrid nanofluid in MQL condition in orthogonal turning and a sustainability assessment / E. Usluer, U. Emiroğlu, Y.F. Yapan, G. Kshitij, N. Khanna, M. Sarıkaya, A. Uysal // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2023. – Vol. 36 (16). – P. e00618. – DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00618.

16. Evaluation of machining characteristics of SiO_2 doped vegetable based nanofluids with Taguchi approach in turning of AISI 304 steel / A.Ç. Şencan, Ş. Şirin, E.N.S. Saraç, B. Erdoğan, M.R. Koçak // *Tribology International*. – 2024. – Vol. 191. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109122.

17. Machinability assessment of hybrid nano cutting oil for minimum quantity lubrication (MQL) in hard turning of 90CrSi steel / T.B. Ngoc, T.M. Duc, N.M. Tuan, V.L. Hoang, T.T. Long // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11 (2). – P. 54. – DOI: 10.3390/lubricants11020054.

18. Junankar A.A., Yashpal Y., Purohit J.K. Experimental investigation to study the effect of synthesized and characterized monotype and hybrid nanofluids in minimum quantity lubrication assisted turning of bearing steel // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2022. – Vol. 236 (9). – P. 1794–1813.

19. Evaluating the effect of minimum quantity lubrication during hard turning of AISI D3 steel using vegetable oil enriched with nano-additives / A.M.M. Ibrahim, M.A. Omer, S.R. Das, W. Li, M.S. Alsoufi, A. Elsheikh // *Alexandria Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 61 (12). – P. 10925–10938.

20. Ngol M.T. Influence of technology parameters on the total cutting force in the hard turning process with NF MQL and NF MQCL method using nanofluids // *Tribology in Industry*. – 2023. – Vol. 44 (2). – P. 272–284. – DOI: 10.24874/ti.1453.02.23.05.

21. Pasam V.K., Neelam P. Effect of vegetable oil-based hybrid nano-cutting fluids on surface integrity of titanium alloy in machining process // *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. – 2020. – Vol. 4 (1). – P. 1–18.

22. Usca Ü.A. The effect of cellulose nanocrystal-based nanofluid on milling performance: an investigation of dillimax 690T // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15 (23). – P. 4521. – DOI: 10.3390/polym15234521.

23. A novel study on the influence of graphene-based nanofluid concentrations on the response characteristics and surface-integrity of Hastelloy C-276 during minimum quantity lubrication / G. Singh, S. Sharma, A.H. Seikh, C. Li, Y. Zhang, S. Rajkumar, A. Kumar, R. Singh, S.M. Eldin // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9 (9). – P. e19175. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19175.

24. Das A., Patel S.K., Das S.R. Performance comparison of vegetable oil based nanofluids towards machinability improvement in hard turning of HSLA steel using minimum quantity lubrication // *Mechanics & Industry*. – 2019. – Vol. 20 (5). – P. 506. – DOI: 10.1051/meca/2019036.

25. Tribological performance of different concentrations of Al_2O_3 nanofluids on minimum quantity lubrication milling / X. Bai, J. Jiang, C. Li, L. Dong, H.M. Ali, S. Sharma // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 36 (1). – P. 11.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Investigation of vegetable-based hybrid nanofluids on machining performance in MQL turning

Javvadi Eswara Manikanta^{1, a}, Nitin Ambhore^{2, b, *}, Sonal Shamkuwar^{3, c},
 Naveen Kumar Gurajala^{4, d}, Santha Rao Dakarapu^{5, e}

¹ Department of Mechanical Engineering, Shri Vishnu Engineering College for Women (A), Bhimavaram, Andhra Pradesh, 534202, India

² Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, SPPU, Maharashtra, Pune 411037, India

³ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Information Technology, SPPU, Maharashtra, Pune 411048, India

⁴ Department of Mechanical Engineering, CMR College of Engineering and Technology, Hyderabad, Telangana, 501401, India

⁵ Department of Mechanical Engineering, Visakha Institute of Engineering and Technology, Narava, Visakhapatnam, 530027, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-0881-4899>, manijem66@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>, nitin.ambhore@viit.ac.in;

^c <https://orcid.org/0000-0001-7633-0813>, sonal.shamkuwar@viit.ac.in; ^d <https://orcid.org/0000-0003-0829-7622>, naveenkumargurijala84@gmail.com;

^e <https://orcid.org/0000-0001-7679-7448>, dsantharao@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 August 2024

Revised: 21 August 2024

Accepted: 17 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Nanofluid

Lubrication

Machining Performance

Turning

ABSTRACT

Introduction. Vegetable-based hybrid nanofluids are increasingly important in the context of *Minimum Quantity Lubrication (MQL)* turning due to its enhanced lubrication properties and environmental benefits. These nanofluids, which typically combine vegetable oils with nanoparticles like graphite or titanium dioxide, improve machining performance by reducing friction and cutting forces, leading to better surface finish and tool life. **The purpose of the work.** Coated carbide tools are widely used for machining *SS 304* stainless steel due to its wear resistance and high temperature resistance. The purpose of the current work is to evaluate the machining performance of *SS 304* steel under different concentrations of hybrid nanofluids. **The methods of investigation.** In this study, an attempt was made to use copper oxide/aluminum oxide ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) hybrid nanoparticles mixed with corn oil. A total of six hybrid cutting fluids with 100 ml volume and different mass concentration (0.4 %, 0.8 %, 1.2 %, 1.6 %, 2 %, and 2.4 %) were developed and its performance on *SS 304* steel was investigated. **Results and discussion.** The finding revealed that with an increase in the mass concentration, the thermophysical properties improve. In addition, it is shown that friction decreases with an increase in the particle concentration to 1.6 wt. %. At a concentration of 1.6 wt. % of $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ hybrid cutting nanofluid showed the best performance characteristics. This study also provides a comparison with dry turning. The highest tool wear was observed in dry turning, followed by turning using corn oil. A 32 % reduction in cutting force is observed. The surface roughness when using $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ hybrid cutting nanofluid is reduced by 27.7 %. However, when using a hybrid nanofluid (2.4 % of $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$), low tool wear is observed. In this study, the possibility of using vegetable-based hybrid nanofluids for metal turning with a minimum amount of lubricant is considered.

For citation: Manikanta J.E., Ambhore N., Shamkuwar S., Gurajala N.K., Dakarapu S.R. Investigation of vegetable-based hybrid nanofluids on machining performance in MQL turning. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 6–18. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-6-18. (In Russian).

References

1. Singh G., Aggarwal V., Singh S., Singh B., Sharma S., Singh J., Li C., Królczyk G., Kumar A., Eldin S.M. Performance investigations for sustainability assessment of Hastelloy C-276 under different machining environments. *Heliyon*, 2023, vol. 9 (3). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13933.

* Corresponding author

Ambhore Nitin, Ph.D. (Engineering), Assistant Professor
 Vishwakarma Institute of Technology,
 Pune - 411037, Maharashtra, India
 Tel.: +91-2026950441, e-mail: nitin.ambhore@viit.ac.in

2. Bedi S.S., Behera G.C., Datta S. Effects of cutting speed on MQL machining performance of AISI 304 stainless steel using uncoated carbide insert: application potential of coconut oil and rice bran oil as cutting fluids. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 8877–8893. DOI: 10.1007/s13369-020-04554-y.
3. Eswara J.E., Raju B.N., Prasad C., Sankar B.S.S.P. Machining performance on SS304 using nontoxic, biodegradable vegetable-based cutting fluids. *Chemical Data Collections*, 2022, vol. 42. DOI: 10.1016/j.cdc.2022.100961.
4. Ambhore N., Kamble D., Agrawal D. Experimental investigation of induced tool vibration in turning of hardened AISI52100 steel. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022, vol. 10, pp. 1679–1689. DOI: 10.1007/s42417-022-00473-4.
5. Ali M.A.M., Azmi A.I., Murad M.N., Zain M.Z.M., Khalil A.N.M., Shuaib N.A. Roles of new bio-based nanolubricants towards eco-friendly and improved machinability of Inconel 718 alloys. *Tribology International*, 2020, vol. 144. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106106.
6. Singh G., Aggarwal V., Singh S. Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 271. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122185.
7. Kumar M.S., Krishna V.M. An investigation on turning AISI 1018 steel with hybrid biodegradeable nanofluid/MQL incorporated with combinations of CuO-Al₂O₃ nanoparticles. *Materails Today: Proceedings*, 2020, vol. 24, pp. 1577–1584. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.478.
8. Zhang S., Li J.F., Wang Y.W. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 32, pp. 81–87. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.014.
9. Rajaguru J., Arunachalam N. A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 276. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116417.
10. Tefera A.G., Sinha D.K., Gupta G. Experimental investigation and optimization of cutting parameters during dry turning process of copper alloy. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2023, vol. 70 (1), p. 145. DOI: 10.1186/s44147-023-00314-5.
11. Nune M.M.R., Chaganti P.K. Development, characterization, and evaluation of novel eco-friendly metal working fluid. *Measurement*, 2019, vol. 137, pp. 401–416. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.066.
12. Manikanta J.E., Raju B.N., Ambhore N., Santosh S. Optimizing sustainable machining processes: a comparative study of multi-objective optimization techniques for minimum quantity lubrication with natural material derivatives in turning SS304. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024, vol. 18 (2), pp. 789–800. DOI: 10.1007/s12008-023-01706-w.
13. Asadi A., Asadi M., Rezaniakolaei A., Rosendahl L.A., Afrand M., Wongwises S. Heat transfer efficiency of Al₂O₃-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: an experimental and theoretical investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 117, pp. 474–486. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.036.
14. Song Y., Cao H., Qu D., Yi H., Kang X., Huang X., Zhou J., Yan C. Surface integrity optimization of high speed dry milling UD-CF/PEEK based on specific cutting energy distribution mechanisms effected by impact and size effect. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 79, pp. 731–744. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.05.024.
15. Usluer E., Emiroğlu U., Yapan Y.F., Kshitij G., Khanna N., Sarıkaya M., Uysal A. Investigation on the effect of hybrid nanofluid in MQL condition in orthogonal turning and a sustainability assessment. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, vol. 36 (16), p. e00618. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00618.
16. Şencan A.Ç., Şirin Ş., Saraç E.N.S., Erdoğan B., Koçak M.R. Evaluation of machining characteristics of SiO₂ doped vegetable based nanofluids with Taguchi approach in turning of AISI 304 steel. *Tribology International*, 2024, vol. 191. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109122.
17. Ngoc T.B., Duc T.M., Tuan N.M., Hoang V.L., Long T.T. Machinability assessment of hybrid nano cutting oil for minimum quantity lubrication (MQL) in hard turning of 90CrSi steel. *Lubricants*, 2023, vol. 11 (2), p. 54. DOI: 10.3390/lubricants11020054.
18. Junankar A.A., Yashpal Y., Purohit J.K. Experimental investigation to study the effect of synthesized and characterized monotype and hybrid nanofluids in minimum quantity lubrication assisted turning of bearing steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2022, vol. 236 (9), pp. 1794–1813.

19. Ibrahim A.M.M., Omer M.A., Das S.R., Li W., Alsoufi M.S., Elsheikh A. Evaluating the effect of minimum quantity lubrication during hard turning of AISI D3 steel using vegetable oil enriched with nano-additives. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, vol. 61 (12), pp. 10925–10938.
20. Ngol M.T. Influence of technology parameters on the total cutting force in the hard turning process with NF MQL and NF MQCL method using nanofluids. *Tribology in Industry*, 2023, vol. 44 (2), pp. 272–284. DOI: 10.24874/ti.1453.02.23.05.
21. Pasam V.K., Neelam P. Effect of vegetable oil-based hybrid nano-cutting fluids on surface integrity of titanium alloy in machining process. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 2020, vol. 4 (1), pp. 1–18.
22. Usca Ü.A. The effect of cellulose nanocrystal-based nanofluid on milling performance: an investigation of dillimax 690T. *Polymers*, 2023, vol. 15 (23), p. 4521. DOI: 10.3390/polym15234521.
23. Singh G., Sharma S., Seikh A.H., Li C., Zhang Y., Rajkumar S., Kumar A., Singh R., Eldin S.M. A novel study on the influence of graphene-based nanofluid concentrations on the response characteristics and surface-integrity of Hastelloy C-276 during minimum quantity lubrication. *Heliyon*, 2023, vol. 9 (9), p. e19175. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19175.
24. Das A., Patel S.K., Das S.R. Performance comparison of vegetable oil based nanofluids towards machinability improvement in hard turning of HSLA steel using minimum quantity lubrication. *Mechanics & Industry*, 2019, vol. 20 (5), p. 506. DOI: 10.1051/meca/2019036.
25. Bai X., Jiang J., Li C., Dong L., Ali H.M., Sharma S. Tribological performance of different concentrations of Al_2O_3 nanofluids on minimum quantity lubrication milling. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 36 (1), p. 11.

Conflicts of Interest

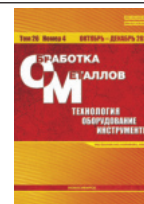
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава

Йогираджа Дама^{1, а, *}, Бхагван Джоги^{1, б}, Раджу Паваде^{1, в}, Атул Кулкарни^{2, д}

¹ Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере, Райгад, Махараштра, 402103, Индия

² Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Махараштра, Пуне – 411048, Индия

^а  <https://orcid.org/0009-0008-5404-4347>,  yogirajdama@dbatu.ac.in; ^б  <https://orcid.org/0000-0003-2099-7533>,  bfjogi@dbatu.ac.in;

^в  <https://orcid.org/0000-0001-7239-625X>,  rspawade@dbatu.ac.in; ^д  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>,  atul.kulkarni@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678.8

История статьи:

Поступила: 18 августа 2024

Рецензирование: 10 сентября 2024

Принята к печати: 17 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

3D-печать

Биоматериалы

Технология послойной печати

Имплантат

Ориентация печати

Полилактидная кислота

Износостойкость

АННОТАЦИЯ

Введение. Операция по эндопротезированию тазобедренного сустава предполагает замену поврежденного сустава имплантатом, который может восстановить его функциональность. Технология 3D-печати более перспективна, чем традиционный производственный процесс, когда речь заходит о создании более сложных деталей и форм. Цель текущего исследовательского проекта: определить, насколько быстро можно изготовить имплантат из биоматериала для эндопротезирования тазобедренного сустава с использованием 3D-печати, изучив скорость износа изделий, изготовленных при использовании различных направлений печати. Несмотря на наличие нескольких технологий аддитивного производства, технология послойного наплавления (FDM – fuse deposition modeling) оказала значительное влияние на здравоохранение, автомобильную промышленность и др. В основном это объясняется адаптируемостью различных композиционных материалов на основе полимеров и их экономичностью. Такие полимеры, напечатанные на 3D-принтере, нуждаются в дальнейшем изучении для оценки износа в зависимости от различных направлений 3D-печати. Биоматериалы на основе полилактидной кислоты (PLA – polylactic acid) были тщательно изучены с целью определения их пригодности в качестве материалов для изготовления тазобедренных суставов. **Цель работы.** В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния направления печати на износ в условиях сухого трения скольжения материала из полилактидной кислоты (PLA), полученного путем послойного наплавления (FDM), по схеме «штифт – диск (SS 316)». Кроме того, были разработаны экспериментальные и эмпирические модели для прогнозирования производительности с учетом влияния нагрузки и скорости скольжения. Для определения оптимальных параметров был использован алгоритм реляционного анализа «серых» систем. **Методы исследования.** Методом FDM-печати в различных направлениях изготовлен штифт. Под направлением печати подразумевается печать под углами 0°, 45° и 90°, при этом все остальные параметры 3D-печати оставались неизменными. Испытание на износ проводили по кинематической схеме «штифт – диск». В ходе экспериментов варьировалась нормальная нагрузка на штифт и скорость вращения диска. Эксперименты были методически разработаны для изучения влияния входных параметров на удельную скорость износа. Было проведено около 13 экспериментов на каждое направление печати при пути трения, равном 4 км, в диапазоне нагрузки 400–800 Н при скорости скольжения 450–750 об/мин. **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования были получены важные результаты, особенно касающиеся направления 3D-печати компонентов. Было обнаружено, что наименьший износ при трении скольжения наблюдается у штифта, напечатанного под углом 0°, чуть больший износ характерен для штифта, напечатанного под углом 90°. Соединение слоев на штифте, напечатанном под углом 45°, деформировалось при более высокой нагрузке в основном из-за повышения температуры. Низкая прочность соединения в штифте, напечатанном под углом 45°, привела к сильному износу при трении скольжения. Оптимальный результат достигнут при скорости скольжения 451 об/мин и нагрузке 600 Н. Результаты исследования очень полезны при выборе материалов для 3D-печати биомедицинских имплантатов, изделий медицинского и промышленного назначения.

Для цитирования: Влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом FDM: исследование для имплантата тазобедренного сустава / Й.Б. Дама, Б.Ф. Джоги, Р. Паваде, А.П. Кулкарни // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40.

Введение

Исследователи постоянно пытаются найти альтернативные биоматериалы и производственные процессы с целью применения их в области медицины [1]. Для создания более сложных деталей и форм технология 3D-печати является бо-

*Адрес для переписки

Дама Йогираджа Басаврадж, научный сотрудник
Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара,
Лонере, Райгад,
402103, Махараштра, Индия
Тел.: +91-9860384360, e-mail: yogirajdama@dbatu.ac.in

лее перспективной, чем традиционные методы производства. Процесс 3D-печати, также называемый процессом *аддитивного производства*, нашел широкое применение в инженерной сфере, особенно для проектирования сложных компонентов и печати по требованию [2]. Однако эта технология еще не зарекомендовала себя в области медицины из-за многих ограничений, таких как доступность биоматериалов для 3D-печати, направление печати, одобрение регулирующих органов, надежность в долгосрочной перспективе, использование напечатанных изделий в организме пациента в режиме реального времени и др. Поэтому исследователи сосредоточились на использовании процесса 3D-печати в медицинской сфере [1].

Тазобедренный сустав, а следовательно, и имплантат тазобедренного сустава, является одним из наиболее важных элементов в организме человека по сравнению с любыми другими суставами. Несмотря на значительный прогресс в разработке имплантатов тазобедренного сустава с использованием различных биоматериалов, включая металл, керамику и полимеры, все еще остается много возможностей для исследований и разработок индивидуальных имплантатов тазобедренного сустава, даже несмотря на то, что за последние несколько столетий биоматериалы и методы эндопротезирования тазобедренного сустава прошли долгий путь развития. Тазобедренный сустав соединяет бедра с тазом, принимая на себя весь вес человеческого тела. Тазобедренный сустав является одним из самых важных суставов, поддерживающих человеческое тело. Естественным местом расположения вертлужной впадины является чашеобразная полость, в которую точно входит гладкая сферическая головка бедренной кости. Прочные связки охватывают весь сустав, обеспечивая стабильность. Внедрение инноваций в области дизайна и материалов способствовало весомому уменьшению реальной скорости износа самых популярных имплантатов, что, в свою очередь, позволяет значительно снизить риски, связанные с обширным распространением обломков в организме человека.

Такие биоматериалы, как сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и другие широко используются

в медицине для изготовления имплантатов традиционным способом и хорошо зарекомендовали себя [3, 4]. Льюис (Lewis) [5] изучал свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена с поперечно сшитыми молекулами. Ванг и соавторы (Wang et al.) обнаружили, что смазывающие и износостойкие свойства полиэтилена при тотальной замене суставов улучшаются [6]. Юсуф и Мохсин (Yousuf and Mohsin) [7] изучали повышение скорости износа полиэтилена высокой плотности за счет добавления керамических частиц. Однако имплантированные полиэтиленовые чашки для вертлужной впадины образуют мусор, на который реагирует иммунная система организма [8]. Для улучшения механических и трибологических характеристик ПЭВП-матрицы в нее были добавлены нанокompозиты, включающие графен, наночастицы TiO_2 и гибридные нанонаполнители, что в конечном итоге привело к увеличению срока службы и снижению скорости износа [9].

Чжан с соавторами (Zhang et al.) [10] рассматривали применение ПЭЭК в качестве альтернативы CoCrMo в бедренном компоненте тотального эндопротеза коленного сустава. Переломы бедра у пожилых людей являются опасными травмами, которые приводят к увеличению заболеваемости и смертности, инвалидности и значительному спросу на медицинские ресурсы. Для обоснования хирургической стратегии гемиаартропластики при лечении переломов бедра недостаточно качественных данных [11].

В настоящем исследовании для 3D-печати биомедицинских имплантатов рассмотрен PLA-материал. Данные о PLA-материале, используемом в имплантатах тазобедренного сустава, представлены в очень немногих исследованиях. Согласно Тол и соавторам (Tol et al.) [11], по результатам рандомизированного клинического исследования с участием 555 пациентов и естественного эксперимента с участием 288 человек не было выявлено различий в качестве жизни через шесть месяцев после травмы между хирургическими вмешательствами. По сравнению с DLA, PLA была связана со значительно большим количеством повторных операций и вывихов. В 2020 году Обинна с соавторами (Obinna et al.) [12] изучали 3D-печать для изготовления имплантатов тазобедренного сустава.

Бхагия С. и соавторы (Bhagia S. et al.) [13] провели обзор PLA-биокмпозитов, содержащих ресурсы биомассы, и охарактеризовали их как биоразлагаемые, пригодные для вторичной переработки и имеющие потенциал для процесса получения топлива, электрической, тепловой энергии и химикатов из биомассы, а также печати по технологии FDM. Для технологии послойного наплавления (FDM) Прашант Анерао (Prashant Anerao) [14] провел параметрическое исследование механических характеристик PLA-композита, армированного биоуглем.

Проведено сравнительное исследование и анализ корпусов слуховых аппаратов, напечатанных из различных биоматериалов [15]. С помощью ANSYS Explicit Workbench было проведено сравнительное исследование различных полимерных материалов на пяти различных скоростях для испытания на удар при падении. Согласно исследованию, термополиуретан (ТПУ) деформируется до максимума при всех скоростях – больше, чем PLA или акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС) [15].

Дама с соавторами (Dama et al.) [16] указали на пригодность процесса аддитивного производства для воспроизведения конструктивных особенностей. Однако эти материалы не подходят для 3D-печати в том формате, который досту-

пен для обычного производственного процесса. 3D-печать методом послойного наплавления (FDM), также называемая изготовлением методом послойного наплавления нитей (FFF), является методом аддитивного производства (AM). Расплавленный материал выборочно наносится по заранее определенному маршруту для создания деталей слой за слоем. Для создания конечных физических изделий используются термопластичные полимеры в форме нитей. Дали с соавторами (Daly et al.) провели параметрическое исследование и наблюдали влияние нескольких факторов 3D-печати, включая направление печати, скорость и метод дискретизации (слой за слоем или нить), на коробление, остаточные напряжения, прогиб и механическое поведение [17].

Санданамсамы с соавторами (Sandanamamy et al.) рассматривали параметры процесса FDM-печати на механические свойства при растяжении PLA-материалов [18]. Мелтем (Meltem) [19] изучил влияние направления FDM-печати на механические свойства при растяжении и время печати детали из PLA-материала. Прочность на разрыв уменьшалась, когда направление печати деталей было изменено с горизонтального на вертикальное и угла печати с 0° до 90° (рис. 1). Прочность на разрыв для вертикально

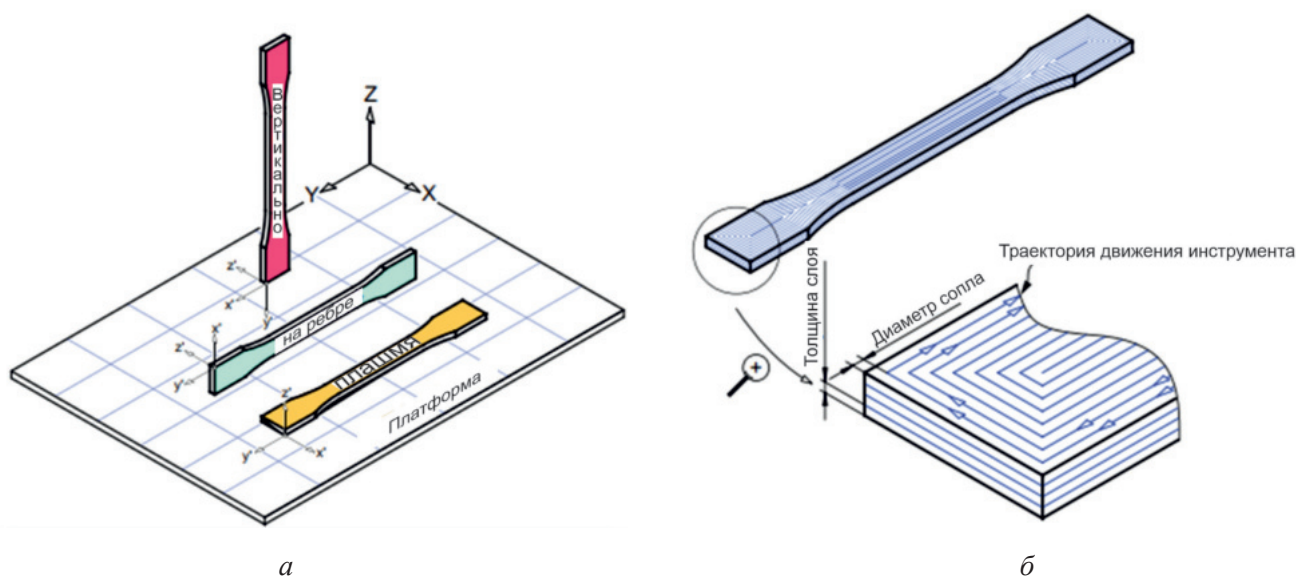


Рис. 1. Параметры печати методом FDM:

a – направление печати; *б* – угол направления растра, равный 0° , и толщина слоя (источник: Чакон и соавт. (Chacón et al.) [20])

Fig. 1. FDM printing parameters:

a – printing orientations; *б* – raster direction angle equal to 0° and layer thickness (source: Chacón et al. [20])

напечатанной детали была на 36 % меньше, чем для горизонтально напечатанной, из-за направления приложения нагрузки и режима разрушения.

Чтобы гарантировать стабильные и высококачественные результаты, на предприятиях по всему миру внедряются передовые производственные процессы, такие как технология послойного наплавления (FDM). По этой причине крайне важно понимать, как взаимодействуют различные компоненты и как они влияют на качество конечной формы. Анализ характера износа изделий из полимолочной кислоты находит множество применений в биомедицине, протезировании, тканевой инженерии и других отраслях.

Биоматериал на основе PLA, напечатанный на 3D-принтере, был тщательно исследован на предмет возможности использования в качестве материала для эндопротезирования тазобедренного сустава путем анализа характера износа и механических свойств.

Цель работы: в ходе экспериментального исследования было изучено влияние направления печати на характер износа PLA-биоматериала, полученного методом послойного наплавления (FDM), в условиях сухого трения скольжения по схеме «штифт – диск (SS 316)». Для прогнозирования производительности моделей, которые являются как эмпирическими, так и полученными экспериментальным путем, учтено влияние скорости скольжения и нагрузки. Для определения идеальных параметров использовали алгоритм реляционного анализа «серых» систем. В работе применялось оборудование для 3D-печати FDM и испытания на износ, имеющееся в распоряжении факультета машиностроения Института информационных технологий Вишвакарма (Пуна, Махараштра, Индия).

Дальнейшие исследования направлены на изучение характера износа композиционных материалов для улучшения показателей скорости износа [21–27]. 3D-печать композиционного биоматериала может быть использована для разработки имплантата с более высокой устойчивостью.

Методы исследования

Трибометр «штифт-на-диске» – это проверенное устройство для анализа износостойкости при скольжении и характеристик износа мате-

риала. Принцип работы трибометра «штифт-на-диске» заключается в том, что диск вращается с постоянной скоростью, в то время как штифт остается неподвижным при заданной нагрузке, и из-за относительного перемещения между штифтом и диском начинается износ. Для регистрации перемещения используется датчик перемещения на основе дифференциального трансформатора (LVDT) на другом конце устройства. Эта машина измеряет коэффициент трения, силу трения, скорость износа, температуру, объем износа и др. Схема трибометра «штифт-на-диске» показана на рис. 2, а, а устройство, используемое для экспериментов, – на рис. 2, б. Станок работает в диапазоне нагрузок 100...800 Н, скорость 20...2000 об/мин. Точность измерения LVDT составляет 1 ± 1 % при измерении износа в микрометрах и наименьшем значении 1 мкм. Испытание проводили в соответствии со стандартом ASTM G 99.

Технология послойного наплавления (FDM) – один из популярных методов 3D-печати, в котором используются термопластичные полимеры для создания сложных 3D-структур. Метод позволяет создавать небольшие функциональные детали простым и экономичным способом. Для печати сложных объектов можно использовать широкий спектр материалов, таких как PLA, нейлон, акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС), политетрафторэтилен (ПТФЭ) и другие, с различными технологическими параметрами. В процессе печати термопластичные нити расплавляются и экструдированы через нагретую насадку, после чего в полутвердом виде наносятся на твердую подложку. Принципиальная схема технологического процесса показана на рис. 3, а. Штифты печатались на 3D-принтере Flashforge Dreamer NX из материала на основе PLA (полимолочной кислоты). На рис. 3, б показана фотография 3D-принтера, использованного для печати штифтов. Все штифты были изготовлены при плотности заполнения 100 %, температуре экструзии 220 °С, с углом растривания 90° и толщиной слоя 0,2 мм. Согласно данным из литературы эти параметры являются оптимальными. В качестве тестовых образцов были использованы цилиндрические штифты из материала на основе PLA диаметром 8 мм и длиной 40 мм. Эти штифты были напечатаны при направлении печати 0°, 45° и 90°. PLA является

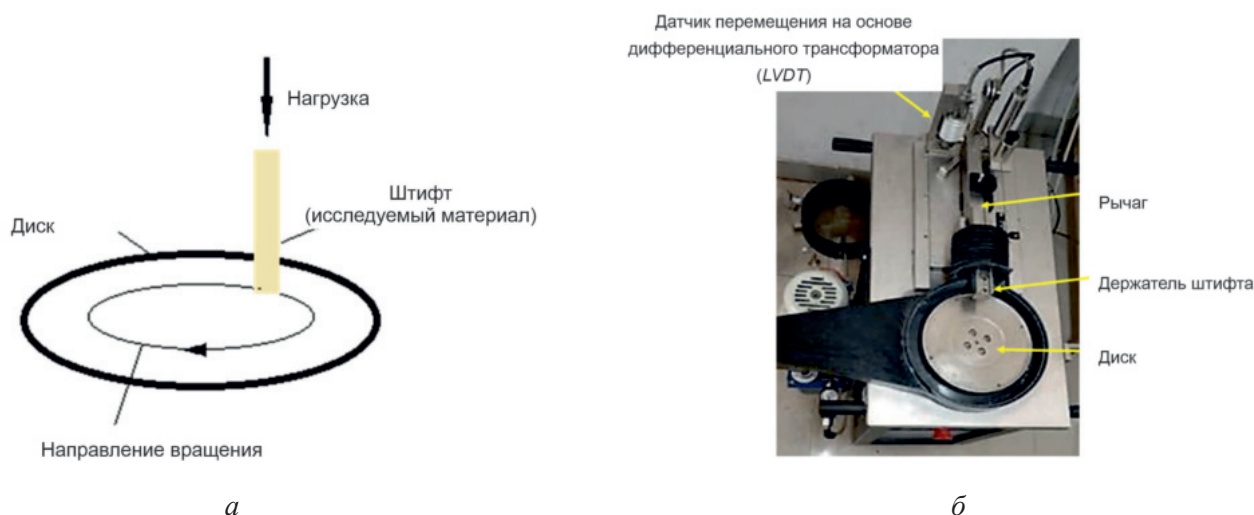


Рис. 2. Принципиальная схема трибометра «штифт-на-диске» (а); экспериментальная установка трибометра «штифт-на-диске» (б)

Fig. 2. Schematic diagram of the pin-on-disk tribometer (a); experimental setup of the pin-on-disk tribometer (b)

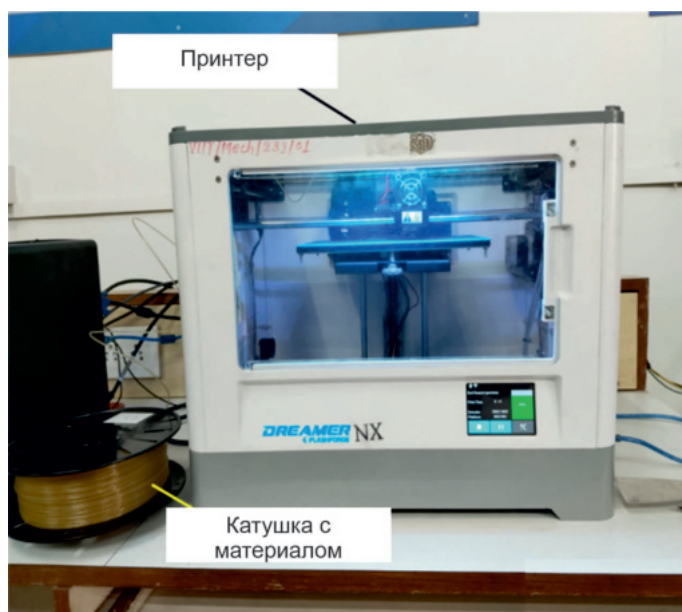
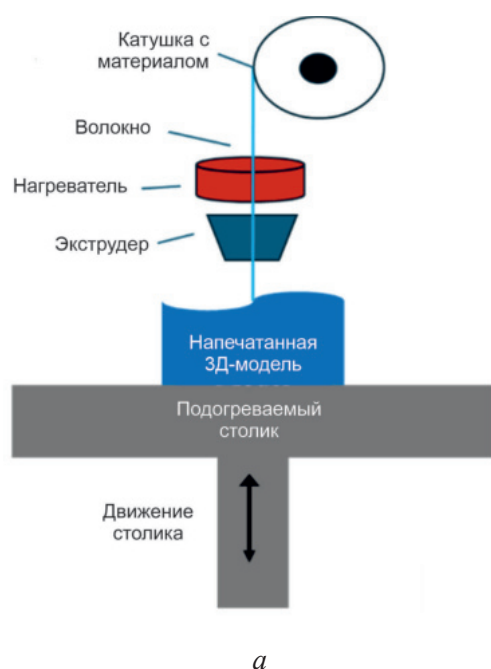


Рис. 3. Схема FDM-печати (а) и 3D-принтер FDM (Flashforge-Dreamer NX) (б)

Fig. 3. FDM printing scheme (a) and FDM 3D printer (Flashforge-Dreamer NX) (b)

одним из популярных материалов для изготовления волокон, используемых в FDM-печати. PLA-материал прост в печати и под него легко настроить принтер.

Эксперименты были методически спланированы для изучения влияния входных параметров на удельную скорость износа. Значения скорости скольжения получены путем выбора диаметра дорожки на диске и соответствующей скорости

вращения диска. Было проведено около 13 экспериментов на каждое направление печати при пути трения, равном 4 км. Подготовка осуществлялась на основе центрального композиционного плана (CCD), который является эффективным планированием эксперимента (DOE) для метода анализа на поверхности отклика (RSM). В табл. 1 приведены значения параметров, выбранных для эксперимента.

Таблица 1

Table 1

Значения параметров, выбранных для эксперимента
Values of parameters selected for the experiment

Параметры	Минимальное значение	Максимальное значение
Нормальная нагрузка (Н)	400	800
Скорость (об/мин)	450	750
Путь трения 4 км		

В настоящем исследовании для оптимизации параметров, обеспечивающих минимальный износ при скольжении, был использован алгоритм реляционного анализа «серых» систем. Теория серых систем представляет степень «серой» корреляции для описания степени сходства в развивающихся тенденциях различных вещей или различных факторов. Чем больше степень серой корреляции, тем более похожи вещи, и наоборот. Эта теория преобразует задачу оптимизации с несколькими ответами в ситуацию оптимизации с одним ответом с целевой функцией общей серой реляционной оценки [27].

Метод серого реляционного анализа

Процедура получения решения оптимизации методом серого реляционного анализа выглядит следующим образом.

Шаг 1. Определение входных параметров, которые влияют на несколько выходных переменных.

Шаг 2. Выбор матрицы плана Тагучи и проведение экспериментов.

Шаг 3. Выбор качественных характеристик для каждой выходной переменной.

Шаг 4. Нормализация всех переменных отклика (серая реляционная генерация): формула нормализации «чем меньше, тем лучше» использовалась для перевода исходной последовательности в сопоставимую последовательность и приведена ниже:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^{(o)}(k) - x_i^{(o)}(k)}{\max x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)}.$$

Шаг 5. Определение последовательности отклонений $\Delta 0_i(k)$. Последовательность отклонений $\Delta 0_i(k)$ – это абсолютная разница между эталонной последовательностью $x_0(k)$ и после-

довательностью сопоставимости $x_i(k)$ после нормализации:

$$\Delta 0_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|.$$

Значение $x_0(k)$ считалось равным единице.

Шаг 6. Расчет серого реляционного коэффициента (GRC) для каждого выхода:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta \min + \zeta \Delta \max}{\Delta 0_i(k) + \zeta \Delta \max}.$$

Шаг 7. Расчет серой относительной оценки по среднему значению GRC. Серая реляционная оценка – это средняя сумма серых реляционных коэффициентов, которые определяются следующим образом:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma(x_0(k), x_i(k)).$$

Шаг 8. Определение оптимальных параметров.

Шаг 9. Прогнозирование серой реляционной оценки при настройке оптимальных параметров.

Результаты и обсуждение

Исследование износа при трении скольжения PLA-материала по диску из стали SS 316 было проведено на машине трения по схеме «штифт – диск». На этом станке устройство качелей было выполнено путем прикрепления стержня для передачи нормальной нагрузки на штифт посредством прикрепления грузиков к другому концу. Датчик перемещения на основе дифференциального трансформатора (LVDT) использовался для обнаружения изменения смещения из-за износа материала. Скорость вращения диска варьировалась путем выбора соответствующего диаметра дорожки.

Испытание проводилось на 4-километровом участке пути (приблизительно от 18 до 22 минут).

К машине были подключены панель управления и компьютер, который отображал скорость, силу трения и износ для соответствующих параметров обработки. Программное обеспечение Windcom использовалось для отображения изменения износа и силы трения в зависимости от времени испытания и расстояния пути в 5 км. На рис. 4 показано изображение дорожек трения *PO1*, *PO2* и *PO3*, сформированных на диске SS 316.

Штифты были изготовлены по технологии FDM с направлением печати 0° , 45° и 90° . В дальнейшем штифты, изготовленные с углом

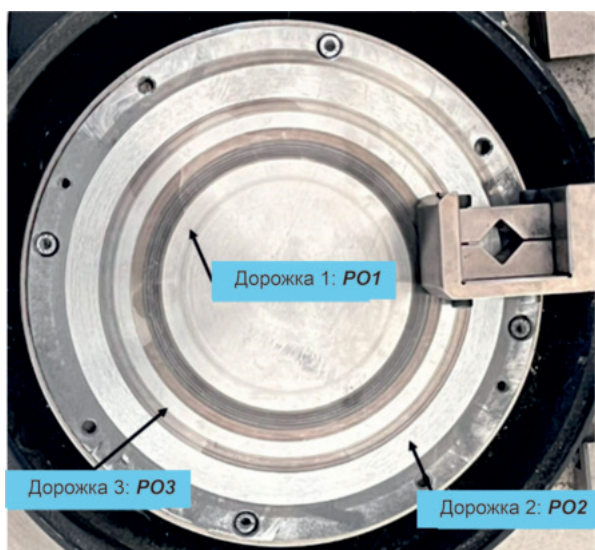


Рис. 4. Изображение дорожек износа штифтов, напечатанных методом FDM, на диске из нержавеющей стали SS 316

Fig. 4. Image of wear tracks of FDM printed pins on a SS 316 stainless steel disc

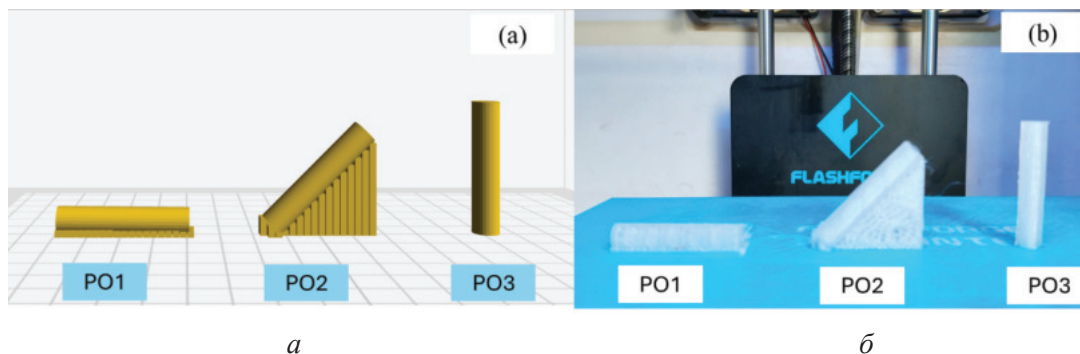
направления печати 0° , 45° и 90° , будут называться *PO1*, *PO2* и *PO3* соответственно. Направление печати штифтов в виде CAD-модели и при реальной печати показаны на рис. 5, а и б соответственно.

Эксперименты проводились согласно плану (DOE), и износ при трении скольжения регистрировался для различных значений нормальной нагрузки и скорости скольжения. Экспериментальные результаты вместе с изображением дорожек износа для всех испытаний сведены в табл. 2 и 3. Все необходимые условия окружающей среды были постоянными для всех экспериментальных испытаний. Математическое уравнение, основанное на степенном законе (обычно степенной закон используется для понимания влияния нескольких входных параметров на выходной отклик), применялось для прогнозирования износа с учетом нормальной нагрузки (H) и скорости (об/мин):

$$W = aF_N^b S^c, \quad (1)$$

где F_N и S – нормальная нагрузка и скорость соответственно; a , b и c – константы.

Значения этих констант были определены для *PO1*, *PO2* и *PO3* с использованием экспериментальных результатов. Математические уравнения для напечатанных методом FDM материалов *PO1*, *PO2* и *PO3* приведены в табл. 4. Для определения корреляции между износом, нормальной нагрузкой и скоростью использовалось программное обеспечение Data fit.



а

б

Рис. 5. Направление 3D-печати:

а – CAD-модель; б – напечатанные штифты

Fig. 5. 3D printing orientation:

а – CAD model; б – printed pins

Экспериментальные результаты испытаний штифтов с различным направлением печати
Experimental results of testing pins with different printing directions

№ эксперимента	Направление печати	Нормальная нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Износ, мкм
1	PO1	800	600	2394
2	PO1	600	451	2178
3	PO1	459	494	2234
4	PO1	600	600	2398
5	PO1	741	494	2367
6	PO1	741	706	2429
7	PO1	401	600	2208
8	PO1	600	600	2320
9	PO1	600	600	2398
10	PO1	600	600	2367
11	PO1	459	706	2214
12	PO1	600	750	2391
13	PO1	600	600	2502
14	PO2	800	600	3293
15	PO2	600	451	3101
16	PO2	459	494	2877
17	PO2	600	600	3267
18	PO2	741	494	3012
19	PO2	741	706	3539
20	PO2	401	600	2896
21	PO2	600	600	3106
22	PO2	600	600	3148
23	PO2	600	600	3178
24	PO2	459	706	3273
25	PO2	600	750	3388
26	PO2	600	600	3147
27	PO3	800	600	3012
28	PO3	600	451	2683
29	PO3	459	494	2598
30	PO3	600	600	2796
31	PO3	741	494	2825
32	PO3	741	706	3201
33	PO3	401	600	2575
34	PO3	600	600	2867

Окончание табл. 2

The End Table 2

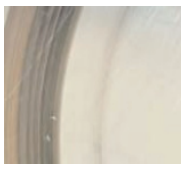
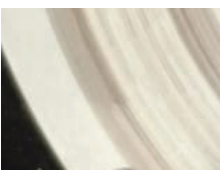
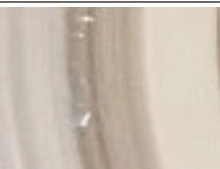
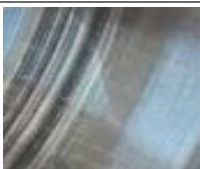
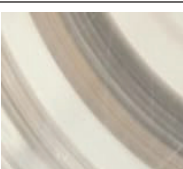
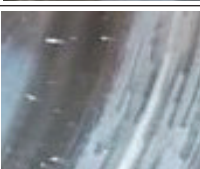
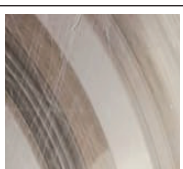
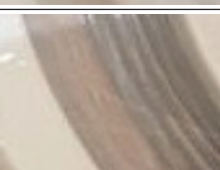
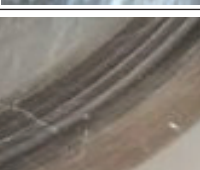
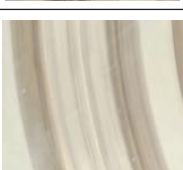
№ эксперимента	Направление печати	Нормальная нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Износ, мкм
35	PO3	600	600	2864
36	PO3	600	600	2854
37	PO3	459	706	2701
38	PO3	600	750	3056
39	PO3	600	600	2910

Таблица 3

Table 3

Изображение дорожек износа для каждого испытания

Image of wear tracks for each test

№ эксперимента	Направление печати	Изображение дорожки износа	Направление печати	Изображение дорожки износа	Направление печати	Изображение дорожки износа
1	PO1		PO2		PO3	
2	PO1		PO2		PO3	
3	PO1		PO2		PO3	
4	PO1		PO2		PO3	
5	PO1		PO2		PO3	
6	PO1		PO2		PO3	

Окончание табл. 3

The End Table 3

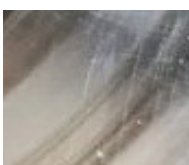
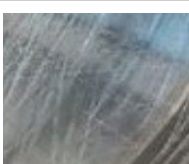
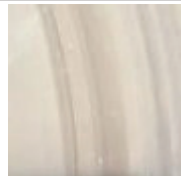
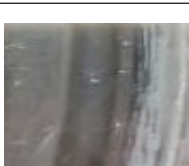
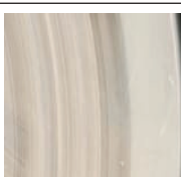
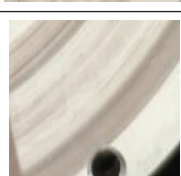
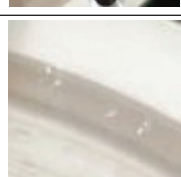
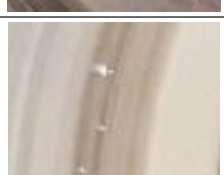
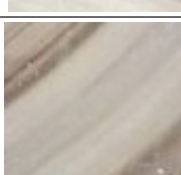
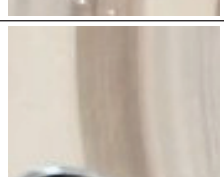
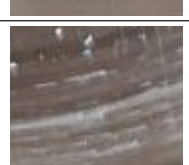
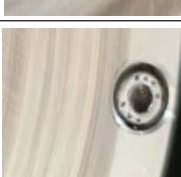
№ эксперимента	Направление печати	Изображение дорожки износа	Направление печати	Изображение дорожки износа	Направление печати	Изображение дорожки износа
7	PO1		PO2		PO3	
8	PO1		PO2		PO3	
9	PO1		PO2		PO3	
10	PO1		PO2		PO3	
11	PO1		PO2		PO3	
12	PO1		PO2		PO3	
13	PO1		PO2		PO3	

Таблица 4

Table 4

Математические уравнения

Mathematical equations

Направление печати	Уравнение
PO1	$W = 432,8 F_N^{0,11} S^{0,16}$
PO2	$W = 234,9 F_N^{0,18} S^{0,23}$
PO3	$W = 123,5 F_N^{0,22} S^{0,27}$

Коэффициент корреляции (R^2) оказался равным 0,9244, 0,928 и 0,95 для $PO1$, $PO2$ и $PO3$ соответственно. Это показало, что разработанное эмпирическое уравнение может быть использовано для определения износа материала при трении о диск из стали SS 316 в пределах выбранного параметра. Из показателя степени всех уравнений видно, что скорость оказывает большее влияние на износ по сравнению с нормальной нагрузкой. Для лучшего понимания характера износа были подготовлены 2D- и 3D-графики. Потеря материала вызвана износом, который в конечном итоге происходит из-за относительно перемещения двух поверхностей. В отличие от трения при этом не происходит потери энергии. В полимерах обычно наблюдаются абразивный, адгезионный и усталостный механизмы износа. Полимеры склонны образовывать пленку, переносимую на контртело, что минимизирует износ, и поэтому их зачастую выбирают в качестве материала для изнашиваемых деталей. Это одно из важных трибологических явлений. Известно также, что когда внутри пленки переноса происходит разделение, то оно происходит между пленкой и полимером, а не между полимером и сталью, поэтому пленка действует как защитный слой, минимизирующий износ. Механизм адгезионного износа полимера является одной из причин развития пленки переноса. Схема формирования такой пленки показана на рис. 6.

PLA является одним из популярных материалов из-за способности разлагаться в естественной среде, биосовместимости и экологичности,

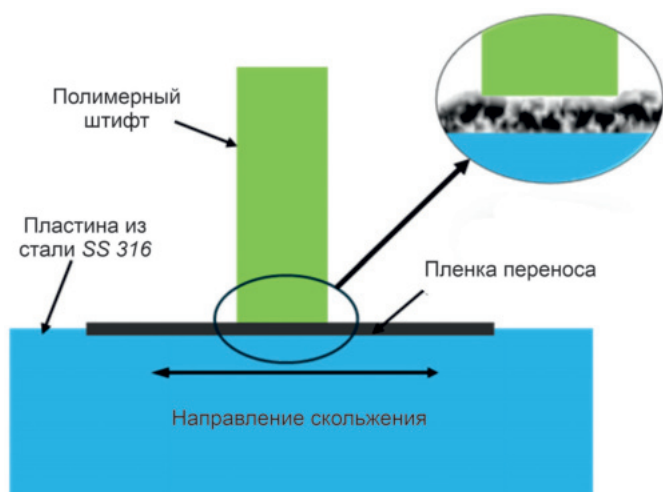


Рис. 6. Формирование пленки переноса

Fig. 6. Formation of the transfer film

а также отсутствия токсичности. Кроме того, поскольку это материал для 3D-печати, то он высоко ценится в биомедицинских приложениях, где есть относительные движения между двумя поверхностями (например, в случае тазобедренных, коленных и других суставов). В литературе сообщалось, что угол направления печати также играет важную роль в характере износа PLA-материала. В настоящем исследовании штифты $PO1$, $PO2$ и $PO3$ были изготовлены с использованием аддитивной технологии с постоянными и оптимизированными параметрами, указанными в литературе, чтобы можно было поддерживать однородность печати. Было изучено влияние нормальной нагрузки и скорости, а также угла печати на характер износа. На рис. 7, а и б показано влияние нормальной нагрузки и скорости на характер износа штифта $PO1$ (угол направления печати 0°).

Постепенное увеличение износа наблюдалось при нормальной нагрузке и переменной скорости. Минимальный износ был равен 2291 мкм, а высота – 2523 мкм. Проанализировав рис. 7, а и б, можно отметить, что наклон графика зависимости износа от скорости увеличился почти на 43 % по сравнению с наклоном графика зависимости износа от нормальной нагрузки. Это показывает, что скорость оказывает заметное влияние на характер износа, и было также очевидно из значений показателя степени уравнения ($PO1$), приведенных в табл. 4. По мере увеличения скорости вибрации в системе усиливаются, что является неблагоприятным условием для формирования стабильной пленки переноса. На рис. 8, а и б показано влияние нормальной нагрузки и скорости на характер износа для штифта $PO2$ (угол направления печати 45°).

Минимальный износ 2948 мкм и максимальный износ 3489 мкм показали, что наклон графика зависимости износа от скорости увеличился почти на 26 % по сравнению с наклоном графика зависимости износа от нормальной нагрузки. Износ $PO2$ больше по сравнению с $PO1$ в рассмотренных случаях. Причиной этому послужило неправильное склеивание материала при угле направления печати 45° . Похожий факт также был описан в литературе.

На рис. 9, а и б показано влияние нормальной нагрузки и скорости на характер износа для штифта $PO3$ (угол направления печати 90°). По-

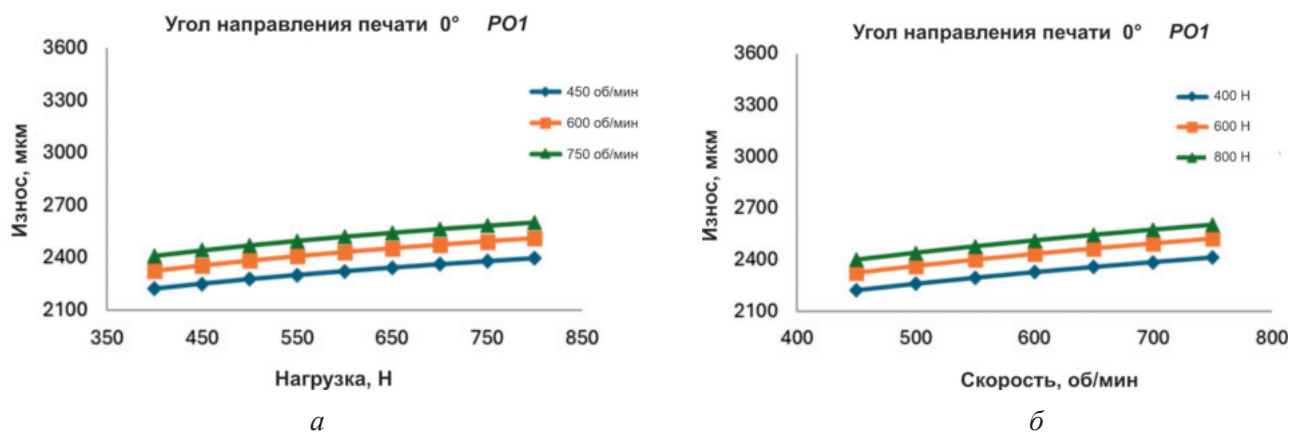


Рис. 7. Влияние нормальной нагрузки (а) и скорости (б) на износ PO1

Fig. 7. Effect of normal load (а) and speed (б) on PO1 wear

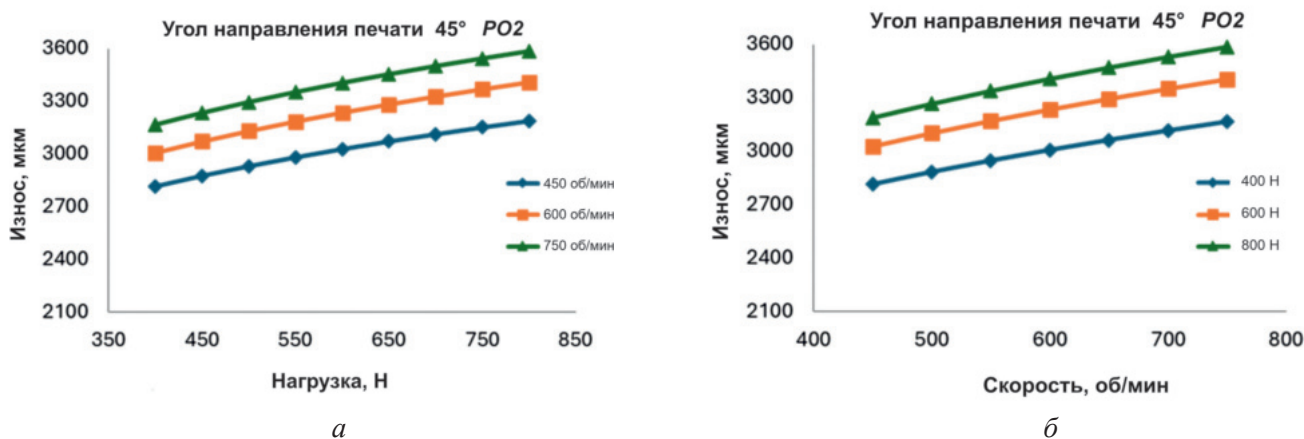


Рис. 8. Влияние нормальной нагрузки (а) и скорости (б) на износ PO2

Fig. 8. Effect of normal load (а) and speed (б) on PO2 wear

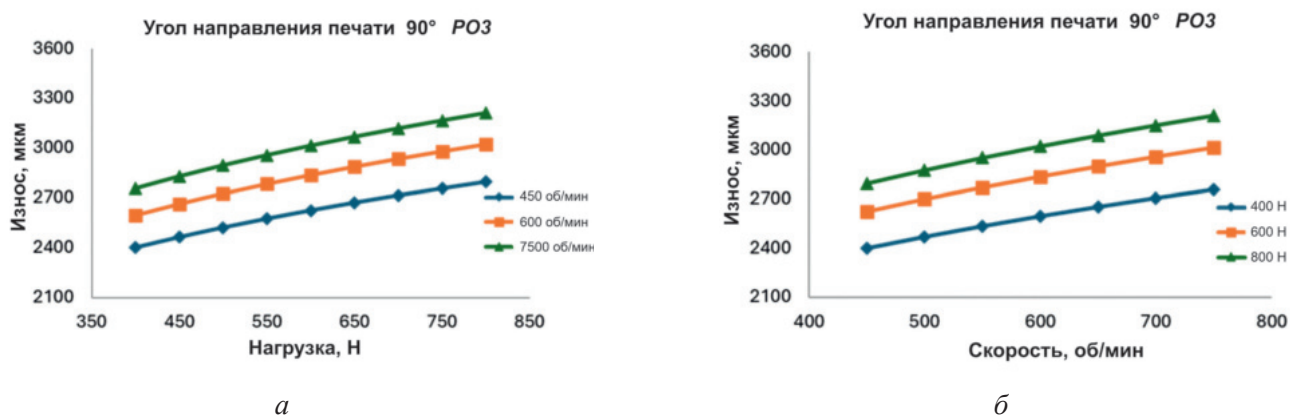


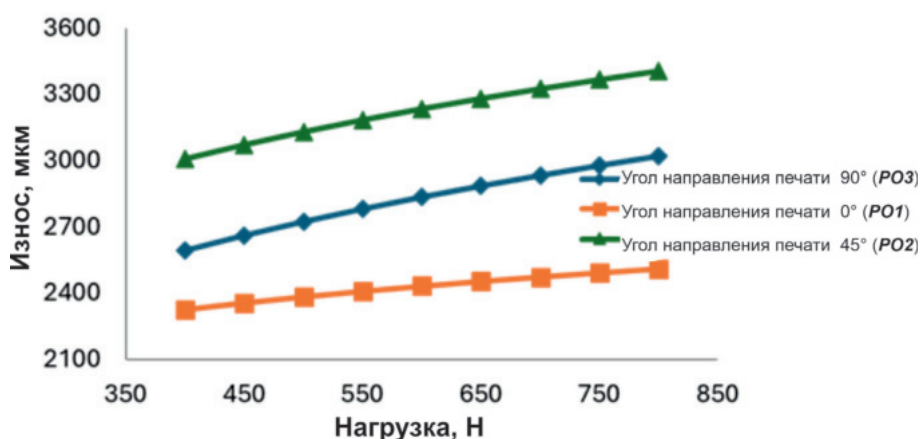
Рис. 9. Влияние нормальной нагрузки (а) и скорости (б) на износ PO3

Fig. 9. Effect of normal load (а) and speed (б) on PO3 wear

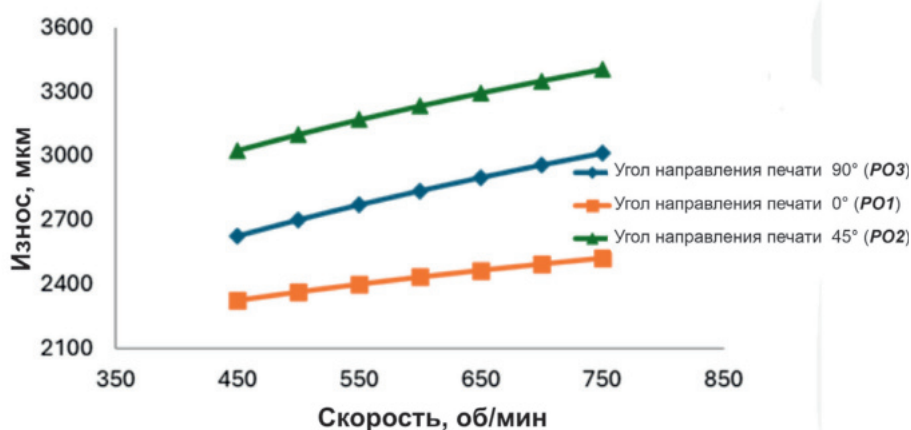
степенное увеличение износа наблюдалось при нормальной нагрузке и переменной скорости. Минимальный зафиксированный износ составил 2538 мкм, а высота – 3106 мкм. Из рис. 9, *а* и *б* очевидно, что наклон графика зависимости износа от скорости увеличился почти на 21 % по сравнению с наклоном графика зависимости износа от нормальной нагрузки. Это показывает, что скорость оказывает заметное влияние на характер износа. На основании значений показателя степени уравнения (*PO1*), приведенных в табл. 4, можно было сделать аналогичный вывод. Анализ приведенных выше рисунков показал, что материал *PO1* изнашивается в меньшей степени, за ним следует материал *PO3*. Материал *PO2* показал самый высокий износ. Износ

PLA, напечатанного с использованием аддитивной технологии (FDM), в большей степени зависит от скорости, чем от нормальной нагрузки.

Сравнительный анализ износа всех образцов был выполнен путем поддержания постоянной скорости и постоянной нагрузки. Уравнение, приведенное в табл. 4, использовалось для определения износа при соответствующей постоянной нагрузке. Влияние нормальной нагрузки на характер износа образцов *PO1*, *PO2* и *PO3* при постоянной скорости 600 об/мин и влияние скорости на характер износа образцов *PO1*, *PO2* и *PO3* при постоянной нормальной нагрузке 600 Н отражено на рис. 10, *а* и *б* соответственно. Нагрузка варьировалась от 400 Н до 800 Н с постоянным приращением 50 Н.



а



б

Рис. 10. Влияние нормальной нагрузки при постоянной скорости 600 об/мин (*а*) и влияние скорости при постоянной нормальной нагрузке 600 Н (*б*) на характер износа образцов *PO1*, *PO2* и *PO3*

Fig. 10. Effect of normal load at constant speed of 600 rpm (*a*) and effect of speed at constant normal load of 600 N (*b*) on wear behavior of *PO1*, *PO2* and *PO3* specimens

Было отмечено, что при постоянной скорости 600 об/мин материал *PO1* показал меньший износ по сравнению с *PO2* и *PO3*. Наименьшее значение износа для *PO1* составило 2328 мкм, а наибольшее зафиксировано на уровне 2513 мкм. Для *PO2* наименьшее значение износа составило 3008 мкм, а наибольшее – 3407 мкм. Для *PO3* наименьшее значение износа составило 2595 мкм, а наибольшее – 3023 мкм. Скорость износа неуклонно возрастала, увеличившись в 1,08, 1,25 и 1,11 раза при повышении нагрузки для образцов *PO1*, *PO2* и *PO3* соответственно. *PO1* показал более стабильный характер износа по сравнению с *PO2* и *PO3*. В основном это было связано с формированием стабильной пленки переноса, которая четко наблюдается на изображениях дорожек износа при испытании материала *PO1*, показанных в табл. 3. Более высокая производительность *PO1* также была связана с углом направления печати FDM (т. е. 0°). Кроме того, материал *PO1* (как показано на рис. 11) с углом направления печати 0° показал превосходную прочность на растяжение и сжатие – в первую очередь потому, что направление печати совпадало с направлением приложения нагрузки. В этом положении слои материала имеют постоянную толщину и большую длину в направлении *PO1*, что, вероятно, улучшает связь между слоями материала, в конечном итоге снижая износ.

Кроме того, в случае материалов *PO2* и *PO3* направление печати составляет 45° и перпендикулярно направлению нагрузки. На сцепление слоев оказывают влияние нагрузка и тепло, выделяемое во время работы [14]. В результате не образуется стабильная пленка переноса. Это также подтверждается изображениями дорожек износа для материалов *PO2* и *PO3*, показанными в табл. 3. В случае *PO2* наблюдалась неравномерная пленка переноса, что привело к плохой износостойкости. Следует также отметить, что сцепление слоев оказалось слабым в образцах, изготовленных с углом направления печати от 30° до 60° [14, 26].

Схематическое изображение направления печати и направления приложения нормальной нагрузки, действующей на штифт во время испытания, показано на рис. 11. Видно, что в случае материала *PO2* нагрузка, действующая на штифт, делится на две составляющие. Горизон-

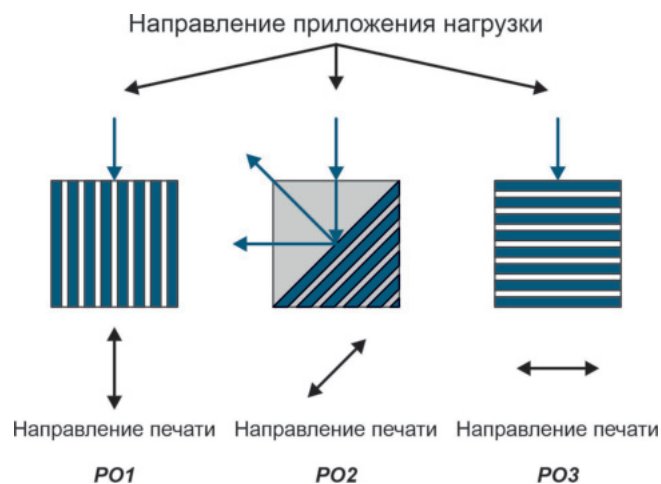


Рис. 11. Схема направления печати и направления приложения нормальной нагрузки, действующей на штифт во время испытания

Fig. 11. Schematic diagram of the printing orientation and the direction of application of the normal load acting on the pin during testing

тальная составляющая пытается ослабить связь между слоями, в результате чего в системе появляется вибрация и из-за этого не формируется стабильная пленка переноса, что приводит к большему износу *PO2*. В случае *PO3* это явление не наблюдалось, поэтому эффективность *PO3* выше, чем *PO2*. Однако следует отметить, что прочность соединения слоев в материале *PO3* меньше, чем в *PO1*, поэтому его эффективность ниже, чем эффективность *PO1*.

Значения нормальной нагрузки и скорости в уравнениях из табл. 4 для материалов *PO1*, *PO2* и *PO3* свидетельствуют о том, что износ в большей степени зависит от нормальной нагрузки, чем от скорости скольжения. Чтобы иметь четкое представление о влиянии входных параметров на износ, с использованием приведенных в табл. 4 эмпирических уравнений были построены трехмерные графики для износа, изменяющегося в зависимости от нормальной нагрузки и скорости скольжения. Трехмерные кривые поверхности построены путем изменения двух параметров процесса одновременно при сохранении третьего параметра постоянным в среднем значении диапазонов параметров, как показано в табл. 1. Трехмерные графики, отражающие изменение износа, показаны на рис. 12, а–в, где отражено изменение износа в зависимости от нормальной нагрузки и скорости для *PO1*, *PO2* и *PO3* соответственно. В ходе исследования

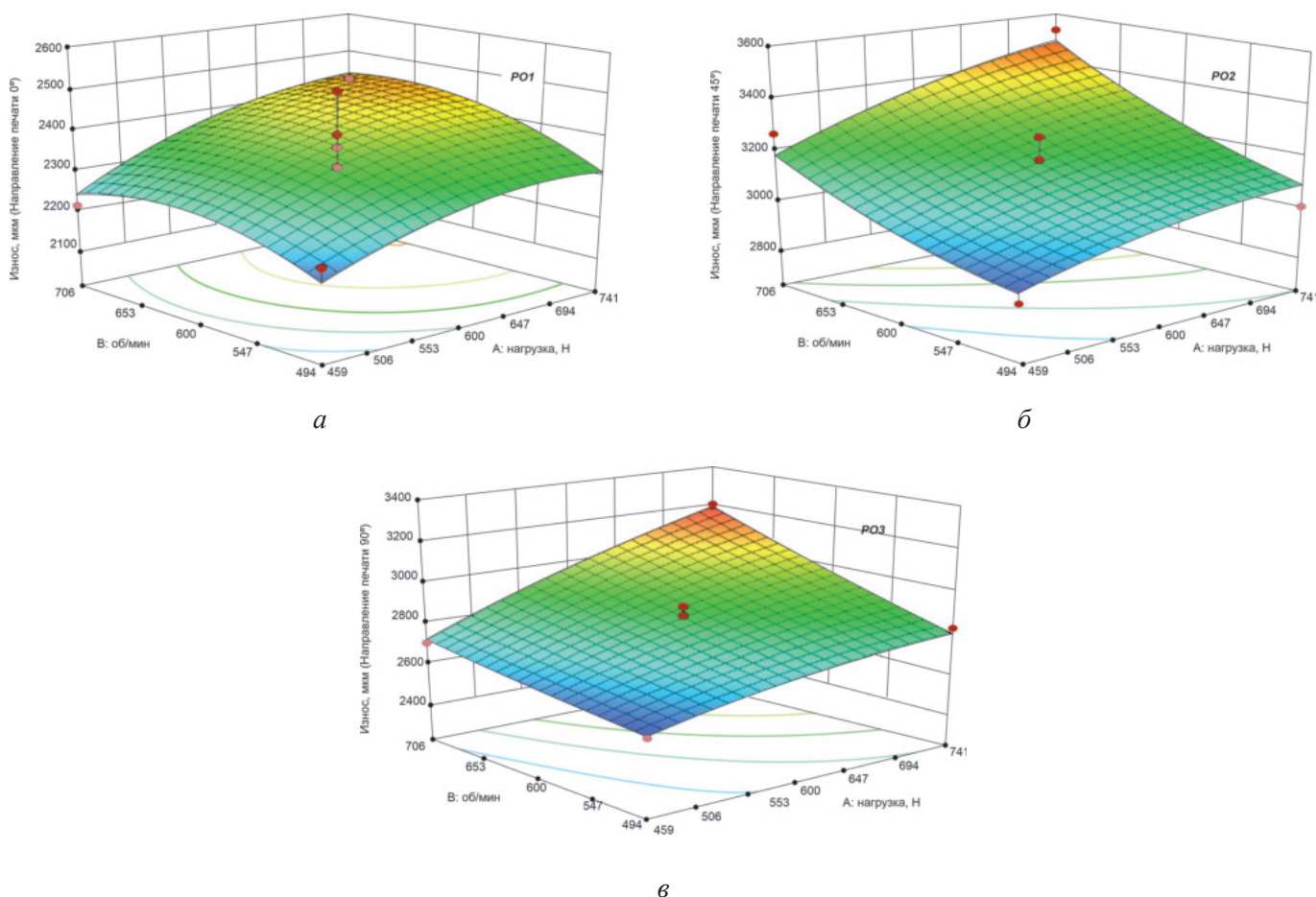


Рис. 12. Трехмерные графики, показывающие изменение износа в зависимости от нормальной нагрузки и частоты вращения для PO1 (а), PO2 (б) и PO3 (в)

Fig. 12. 3D graphs showing the change in wear depending on the normal load and rotation speed for PO1 (a), PO2 (b) and PO3 (c)

было обнаружено влияние взаимодействия параметров процесса и угла направления печати на скорость износа PLA в паре трения с нержавеющей сталью SS 316.

Видно, что износ увеличивается с ростом скорости и нормальной нагрузки. Однако увеличение износа станет более заметным при более высоких параметрах процесса. Скорость и нормальную нагрузку можно рассматривать как наиболее значимые параметры, влияющие на износ. Это также может быть подтверждено более высоким значением показателя степени для скорости и нагрузки (табл. 4). Настоящее исследование показывает, что износ заметно зависит от скорости, особенно при более высоких значениях нормальной нагрузки.

Серый реляционный анализ (алгоритм реляционного анализа серых систем, GRA) – это метод оптимизации множественных откликов, который применялся при оценке производи-

тельности различных сложных приложений с ограниченной информацией. Он широко используется для измерения степени взаимосвязи между последовательностями с помощью серой реляционной оценки. Процедура для GRA описана выше в методологии. В настоящем исследовании входными факторами были нормальная нагрузка и скорость, тогда как GRA проведен для износа материалов PO1, PO2 и PO3. Линейная нормализация экспериментальных результатов для износа была основана на подходе «чем меньше, тем лучше». Эксперименты проводились для различных входных параметров в соответствии с табл. 1 для образцов PO1, PO2 и PO3. Всего было проведено 39 экспериментов, из которых эксперименты 1–13 – для PO1, 14–26 – для PO2 и остальные – для PO3. В соответствии с процедурой GRA нормализации отклика ($x_i(k)$) была определена последовательность отклонения ($\Delta 0_i$) и серый реляционный коэффи-

циент (GRC) для износа. Значения $x_i(k)$, $\Delta 0_i$ и GRC для износа приведены в табл. 5. Более высокий GRC указывает на то, что соответствующие экспериментальные условия являются оптимальными. В целом материал PO1 продемонстрировал превосходные характеристики по сравнению с PO2 и PO3. Однако PO2 продемонстрировал плохие характеристики. Оптимальными значени-

ями нормальной нагрузки и скорости оказались 600 Н и 451 об/мин. Компоненты PLA, напечатанные методом FDM с углом направления печати 0° , наиболее подходят для деталей, подверженных износу, за ними следуют компоненты с углом направления печати 90° . Компоненты, изготовленные с углом направления печати 45° , не следует применять.

Таблица 5

Table 5

Значения GRC для всех экспериментов
GRC values for all experiments

№ эксперимента	Направление	Износ, мкм	$x_i(k)$	0_i	GRC
1	PO1	2394	0,84	0,16	0,758
2	PO1	2178	1	0	1
3	PO1	2234	0,96	0,04	0,926
4	PO1	2398	0,84	0,16	0,758
5	PO1	2367	0,86	0,14	0,781
6	PO1	2429	0,82	0,18	0,735
7	PO1	2208	0,98	0,02	0,962
8	PO1	2320	0,9	0,1	0,833
9	PO1	2398	0,84	0,16	0,758
10	PO1	2367	0,86	0,14	0,781
11	PO1	2214	0,97	0,03	0,943
12	PO1	2391	0,84	0,16	0,758
13	PO1	2502	0,76	0,24	0,676
14	PO2	3293	0,18	0,82	0,379
15	PO2	3101	0,32	0,68	0,424
16	PO2	2877	0,49	0,51	0,495
17	PO2	3267	0,2	0,8	0,385
18	PO2	3012	0,39	0,61	0,45
19	PO2	3539	0	1	0,333
20	PO2	2896	0,47	0,53	0,485
21	PO2	3106	0,32	0,68	0,424
22	PO2	3148	0,29	0,71	0,413
23	PO2	3178	0,27	0,73	0,407
24	PO2	3273	0,2	0,8	0,385
25	PO2	3388	0,11	0,89	0,36
26	PO2	3147	0,29	0,71	0,413
27	PO3	3012	0,39	0,61	0,45
28	PO3	2683	0,63	0,37	0,575
29	PO3	2598	0,69	0,31	0,617
30	PO3	2796	0,55	0,45	0,526
31	PO3	2825	0,52	0,48	0,51
32	PO3	3201	0,25	0,75	0,4
33	PO3	2575	0,71	0,29	0,633
34	PO3	2867	0,49	0,51	0,495

Окончание табл. 5

The End Table 5

№ эксперимента	Направление	Износ, мкм	$x_i(k)$	0_i	GRC
35	PO3	2864	0,5	0,5	0,5
36	PO3	2854	0,5	0,5	0,5
37	PO3	2701	0,62	0,38	0,568
38	PO3	3056	0,35	0,65	0,435
39	PO3	2910	0,46	0,54	0,481

Выводы

В настоящем исследовании продемонстрированы характеристики износа PLA-материала в паре трения с нержавеющей сталью SS 316 для определения оптимальных параметров. Печать FDM использовалась для создания образца с различным направлением печати (0° , 45° , 90°). Эксперименты проводились по схеме трения «штифт – диск» при различной нагрузке и скорости. На основе эксперимента разработана математическая модель. Кроме того, для определения оптимальных параметров использовался серый реляционный анализ, метод оптимизации множественных ответов. Уникальность этого метода в том, что он применяется при оценке эффективности различных сложных систем с недостаточной информацией.

Ниже приведены выводы, сделанные в ходе исследования.

– Исследование PLA-материала, полученного методом FDM с различным направлением печати, показывает, что горизонтально напечатанные штифты имеют меньший износ, чем вертикально напечатанные. Наибольший износ характерен для штифтов, напечатанных под углом 45° .

– Отмечено, что на износ в значительной степени влияет скорость; в меньшей степени влияет нагрузка. Это также подтверждается более высокими значениями показателя степени для скорости и нагрузки. Заметное увеличение износа наблюдалось при более высоких параметрах процесса.

– Образец PLA, напечатанный методом FDM с углом направления печати 0° (PO1), показал меньший износ; больший износ характерен для образца с углом направления печати 90° (PO3). Это в основном связано с высокой прочностью соединения слоев вдоль направления печати для PO1. Образец с направлением печати 45° (PO2) показал плохую износостойкость из-за термиче-

ского размягчения. Оптимальными параметрами для PO1 оказались нагрузка 600 Н и 451 об/мин, что было определено с помощью многопараметрического метода серого реляционного анализа.

– В разработанной экспериментальной математической модели коэффициент корреляции (R^2) составил 0,9244, 0,928 и 0,95 для PO1, PO2 и PO3 соответственно. Эти модели можно использовать для прогнозирования износа напечатанного методом FDM материала PLA в паре трения с нержавеющей сталью SS 316.

– Результаты исследования будут полезны при 3D-печати PLA-биоматериала для применения в тазобедренном суставе.

Список литературы

1. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses // Pharmacy and Therapeutics Journal: Peer Review. – 2014. – Vol. 39 (10). – P. 704–711.
2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Direct digital manufacturing // Additive Manufacturing Technologies. – 2nd ed. – New York: Springer, 2015. – P. 375–397. – DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3_16.
3. Patil N.A., Njuguna J., Kandasubramanian B. UHMWPE for biomedical applications: performance and functionalization // European Polymer Journal. – 2020. – Vol. 125. – P. 109529. – DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109529.
4. Kurtz S.M. Primer on UHMWPE // UHMWPE biomaterials handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical. – 3rd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2016. – P. 1–6.
5. Lewis G. Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene // Biomaterials. – 2001. – Vol. 22 (4). – P. 371–401. – DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00195-2.
6. Lubrication and wear of ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacements / A. Wang, A. Essner, V. Polineni, C. Stark, J. Dumbleton // Tribology International. – 1998. – Vol. 31. – P. 17–33. – DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00005-X.

7. *Yousuf J.M., Mohsin A.A.* Enhancing wear rate of high-density polyethylene (HDPE) by adding ceramic particles to propose an option for artificial hip joint liner // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 561. – P. 012071. – DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012071.
8. Relationship between polyethylene wear and osteolysis in hips with a second-generation porous-coated cementless cup after seven years of follow-up / K.F. Orishimo, A.M. Claus, C.J. Sychterz, C.A. Engh // *The Journal of Bone & Joint Surgery*. – 2003. – Vol. 85 (6). – P. 1095–1099. – DOI: 10.2106/00004623-200306000-00018.
9. Mechanical and tribological performance of HDPE matrix reinforced by hybrid Gr/TiO₂ NPs for hip joint replacement / A. Nabhan, G. Sherif, R. Abouzeid, M. Taha // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2023. – Vol. 14 (3). – P. 140. – DOI: 10.3390/jfb14030140.
10. Wear mechanism and debris analysis of PEEK as an alternative to CoCrMo in the femoral component of total knee replacement / X. Zhang, T. Zhang, K. Chen, H. Xu, C. Feng, D. Zhang // *Friction*. – 2023. – Vol. 11. – P. 1845–1861. – DOI: 10.1007/s40544-022-0700-z.
11. Posterolateral or direct lateral surgical approach for hemiarthroplasty after a hip fracture: a randomized clinical trial alongside a natural experiment / M.C.J.M. Tol, N.W. Willigenburg, A.J. Rasker, H.C. Willems, T. Gosens, M. Heetveld, M.G.M. Schotanus, B. Eggen, M. Kormos, S.L. van der Pas, A. van der Vaart, J.C. Goslings, R.W. Poolman // *JAMA Network Open*. – 2024. – Vol. 7 (1). – P. e2350765. – DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2023.50765.
12. 3D printing for hip implant applications: a review / O. Obinna, I. Stachurek, B. Kandasubramanian, J. Njuguna // *Polymers (Basel)*. – 2020. – Vol. 12 (11). – P. 2682. – DOI: 10.3390/polym12112682.
13. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries / S. Bhagia, K. Bornani, R. Agarwal, A. Satlewal, J. Đurković, R. Lagaña, M. Bhagia, C.G. Yoo, X. Zhao, V. Kunc, Y. Pu, S. Ozcan, A.J. Ragauskas // *Applied Materials Today*. – 2021. – Vol. 24. – P. 101078. – DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101078.
14. Biochar reinforced PLA composite for fused deposition modelling (FDM): a parametric study on mechanical performance / P. Anerao, A. Kulkarni, Y. Munde, A. Shinde, O. Das // *Composites, Part C: Open Access*. – 2023. – Vol. 12. – P. 100406. – DOI: 10.1016/j.jcomc.2023.100406.
15. Comparative analysis of drop impact resistance for different polymer based materials used for hearing aid casing / A. Gosavi, A. Kulkarni, Y. Dama, A. Deshpande, B. Jogi // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 49. – P. 2433–2441. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.519.
16. *Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S.* Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing process for engineering design features: a study and recommendations // *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. – 2024. – Vol. 31 (1s). – P. 94–105. – DOI: 10.52783/cana.v31.559.
17. FDM technology and the effect of printing parameters on the tensile strength of ABS parts / M. Daly, M. Tarfaoui, M. Chihi, C. Bouraoui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126 (11–12). – P. 5307–5323. – DOI: 10.1007/s00170-023-11486-y.
18. Effect of process parameter on tensile properties of FDM printed PLA / L. Sandanamsamy, J. Mogan, K. Rajan, W.S.W. Harun, I. Ishak, F.R.M. Romlay, M. Samykano, K. Kadirgama // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.217.
19. *Eryildiz M.* Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: an experimental investigation // *European Mechanical Science*. – 2021. – Vol. 5 (3). – P. 116–120. – DOI: 10.26701/ems.881254.
20. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection / J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 124. – P. 143–157. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
21. Explainable AI techniques for comprehensive analysis of the relationship between process parameters and material properties in FDM-based 3D-printed biocomposites / N. Kharate, P. Anerao, A. Kulkarni, M. Abdullah // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (4). – P. 171. – DOI: 10.3390/jmmp8040171.
22. Experimental investigation of dry sliding wear behaviour of jute/epoxy and jute/glass/epoxy hybrids using Taguchi approach / A. Paturkar, A. Mache, A. Deshpande, A. Kulkarni // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (11). – P. 23974–23983. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.190.
23. *Satkar A.R., Mache A., Kulkarni A.* Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 59 (1). – P. 734–741. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.464.
24. *Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S.* Investigation of flexural properties of glass-Kevlar hybrid composite // *European Journal of Engineering and Technology Research*. – 2018. – Vol. 1. – P. 25–29. – DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.

25. *Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A.* A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2311 (1). – P. 070030. – DOI: 10.1063/5.0035408.

26. *Чинчаникар С.* Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12X18H10T) // Обработка металлов (техно-

логия, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

27. *Pawade R.S., Joshi S.S.* Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA) // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 56 (1–4). – P. 57–62. – DOI: 10.1007/s00170-011-3183-z.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: Study for hip-joint implant

Yogiraj Dama^{1, a, *}, Bhagwan Jogi^{1, b}, Raju Pawade^{1, c}, Atul Kulkarni^{2, d}

¹ Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, Maharashtra, 402103, India

² Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Maharashtra, Pune - 411048, India

^a <https://orcid.org/0009-0008-5404-4347>, yogirajdama@dbatu.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2099-7533>, bfjogi@dbatu.ac.in;

^c <https://orcid.org/0000-0001-7239-625X>, rspawade@dbatu.ac.in; ^d <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>, atul.kulkarni@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 August 2024

Revised: 10 September 2024

Accepted: 17 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

3D Printing

Biomaterials

FDM

Implant

Print orientation

PLA

Wear behavior

ABSTRACT

Introduction: hip joint replacement surgery involves replacing the damaged joint with an implant that can re-create the joint's articulation functionality. 3D printing technology is more promising than the traditional manufacturing process when it comes to producing more complex parts and shapes. The goal of the current research project is to determine how quickly biomaterial implant can be manufactured using 3D printing for hip-joint replacement by studying the wear rate of parts manufactured using different printing orientations. Although there are several additive manufacturing technologies, fuse deposition modeling (FDM) technology has had a significant impact on healthcare, automotive industry, etc. This is mainly due to the adaptability of different polymer-based composite materials and its cost-effectiveness. Such 3D printed polymers need to be further studied to evaluate the wear rate depending on different 3D printing orientations. Polylactic acid (PLA) biomaterials were extensively studied to determine its suitability for use as hip joint materials. **Purpose of the work:** in this work, an experimental study was carried out on the effect of printing orientation on dry sliding wear of a polylactic acid (PLA) material obtained by fused deposition modeling (FDM) technology using the pin-on-disk (SS 316) scheme. In addition, experimental and empirical models are developed to predict the performance taking into account the influence of load and sliding speed. Grey relational analysis was used to determine the optimal parameters. **The methods of investigation:** the FDM printing was used to manufacture pins using different printing orientations. Printing direction refers to printing at angles of 0°, 45°, and 90°, while all other 3D printing parameters remained unchanged. Wear testing was performed using the pin-on-disk kinematic scheme. During the experiments, the normal pin load and disk rotation speed were varied. The experiments were methodically designed to study the effect of input parameters on the specific wear rate. About 13 experiments were conducted for each printing orientation with a friction path of 4 kilometers, in the load range of 400–800 N, at a sliding speed of 450–750 rpm. **Result and discussion:** the study provides important results especially regarding the direction of 3D printing of components. It was found that the lowest sliding wear was observed for the pin printed at an angle of 0°, while slightly higher wear was observed for the pin printed at an angle of 90°. The layer bonding in the pin printed at an angle of 45° deformed under higher load, mainly due to an increase in temperature. The low bond strength in the pin printed at an angle of 45° resulted in high sliding wear. The optimal result was achieved at a sliding speed of 451 rpm and a load of 600 N. The results of the study are very useful for choosing materials for 3D printing of biomedical implants, medical and industrial products.

For citation: Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R., Kulkarni A.P. Impact of print orientation on wear behavior in FDM printed PLA Biomaterial: Study for hip-joint implant. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 19–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-19-40. (In Russian).

References

1. Ventola C.L. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics Journal: Peer Review*, 2014, vol. 39 (10), pp. 704–711.

* Corresponding author

Dama Yogiraj Basavraj, Research Scholar

Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University,

Lonere, Raigad,

402103, Maharashtra, India

Tel.: +91-9860384360, e-mail: yogirajdama@dbatu.ac.in

2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Direct digital manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*. 2nd ed. New York, Springer, 2015, pp. 375–397. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3_16.
3. Patil N.A., Njuguna J., Kandasubramanian B. UHMWPE for biomedical applications: performance and functionalization. *European Polymer Journal*, 2020, vol. 125, p. 09529. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109529.
4. Kurtz S.M. Primer on UHMWPE. *UHMWPE biomaterials handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical*. 3rd ed. Amsterdam, Elsevier, 2016, pp. 1–6.
5. Lewis G. Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene. *Biomaterials*, 2001, vol. 22 (4), pp. 371–401. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00195-2.
6. Wang A., Essner A., Polineni V., Stark C., Dumbleton J. Lubrication and wear of ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacements. *Tribology International*, 1998, vol. 31, pp. 17–33. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00005-X.
7. Yousuf J.M., Mohsin A.A. Enhancing wear rate of high-density polyethylene (HDPE) by adding ceramic particles to propose an option for artificial hip joint liner. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 561, p. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012071.
8. Orishimo K.F., Claus A.M., Sychterz C.J., Engh C.A. Relationship between polyethylene wear and osteolysis in hips with a second-generation porous-coated cementless cup after seven years of follow-up. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 2003, vol. 85 (6), pp. 1095–1099. DOI: 10.2106/00004623-200306000-00018.
9. Nabhan A., Sherif G., Abouzeid R., Taha M. Mechanical and tribological performance of HDPE matrix reinforced by hybrid Gr/TiO₂ NPs for hip joint replacement. *Journal of Functional Biomaterials*, 2023, vol. 14 (3), p. 140. DOI: 10.3390/jfb14030140.
10. Zhang X., Zhang T., Chen K., Xu H., Feng C., Zhang D. Wear mechanism and debris analysis of PEEK as an alternative to CoCrMo in the femoral component of total knee replacement. *Friction*, 2023, vol. 11, pp. 1845–1861. DOI: 10.1007/s40544-022-0700-z.
11. Tol M.C.J.M., Willigenburg N.W., Rasker A.J., Willems H.C., Gosens T., Heetveld M., Schotanus M.G.M., Eggen B., Kormos M., Pas S.L. van der, Vaart A. van der, Goslings J.C., Poolman R.W. Posterolateral or direct lateral surgical approach for hemiarthroplasty after a hip fracture: a randomized clinical trial alongside a natural experiment. *JAMA Network Open*, 2024, vol. 7 (1), p. e2350765. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2023.50765.
12. Obinna O., Stachurek I., Kandasubramanian B., Njuguna J. 3D printing for hip implant applications: a review. *Polymers (Basel)*, 2020, vol. 12 (11), p. 2682. DOI: 10.3390/polym12112682.
13. Bhagia S., Bornani K., Agarwal R., Satlewal A., Đurković J., Lagaña R., Bhagia M., Yoo C.G., Zhao X., Kunc V., Pu Y., Ozcan S., Ragauskas A.J. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Applied Materials Today*, 2021, vol. 24, p. 101078. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101078.
14. Anerao P., Kulkarni A., Munde Y., Shinde A., Das O. Biochar reinforced PLA composite for fused deposition modelling (FDM): a parametric study on mechanical performance. *Composites, Part C: Open Access*, 2023, vol. 12, p. 100406. DOI: 10.1016/j.jcomc.2023.100406.
15. Gosavi A., Kulkarni A., Dama Y., Deshpande A., Jogi B. Comparative analysis of drop impact resistance for different polymer based materials used for hearing aid casing. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 49, pp. 2433–2441. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.519.
16. Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S. Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing process for engineering design features: a study and recommendations. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31 (1s), pp. 94–105. DOI: 10.52783/cana.v31.559.
17. Daly M., Tarfaoui M., Chihi M., Bouraoui C. FDM technology and the effect of printing parameters on the tensile strength of ABS parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 126 (11–12), pp. 5307–5323. DOI: 10.1007/s00170-023-11486-y.
18. Sandanamsamy L., Mogan J., Rajan K., Harun W.S.W., Ishak I., Romlay F.R.M., Samykano M., Kadirgama K. Effect of process parameter on tensile properties of FDM printed PLA. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.217.
19. Eryildiz M. Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: an experimental investigation. *European Mechanical Science*, 2021, vol. 5 (3), pp. 116–120. DOI: 10.26701/ems.881254.
20. Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 2017, vol. 124, pp. 143–157. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.

21. Kharate N., Anerao P., Kulkarni A., Abdullah M. Explainable AI techniques for comprehensive analysis of the relationship between process parameters and material properties in FDM-based 3D-printed biocomposites. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (4), p. 171. DOI: 10.3390/jmmp8040171.
22. Paturkar A., Mache A., Deshpande A., Kulkarni A. Experimental investigation of dry sliding wear behaviour of jute/epoxy and jute/glass/epoxy hybrids using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (11), pp. 23974–23983. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.190.
23. Satkar A.R., Mache A., Kulkarni A. Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 59 (1), pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.464.
24. Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Investigation of flexural properties of glass-Kevlar hybrid composite. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2018, vol. 1, pp. 25–29. DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.
25. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2311 (1), p. 070030. DOI: 10.1063/5.0035408.
26. Chinchankar S. Modeling of sliding wear characteristics of Polytetrafluoroethylene (PTFE) composite reinforced with carbon fiber against SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 40–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.
27. Pawade R.S., Joshi S.S. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 56 (1–4), pp. 57–62. DOI: 10.1007/s00170-011-3183-z.

Conflicts of Interest

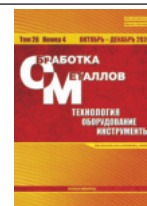
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Искажение геометрии, окисление кромки, структурные изменения и морфология поверхности реза листового проката толщиной 100 мм из алюминиевых, медных и титановых сплавов при плазменной резке на токе обратной полярности

Артём Гриненко ^{1, a}, Андрей Чумаевский ^{2, b, *}, Евгений Сидоров ^{2, c}, Вероника Утяганова ^{2, d},
Алихан Амиров ^{2, e}, Евгений Колубаев ^{2, f}

¹ ООО «ИТС-Сибирь», Красноярск, Северное шоссе, 16а, 660118, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Академический проспект, 2/4, Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>, giga2011@yandex.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0009-0009-2665-7514>, eas@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>, veronika_ru@ispms.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-5143-8235>, amir@ispms.tsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 17 сентября 2024
Рецензирование: 01 октября 2024
Принята к печати: 10 октября 2024
Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Плазменная резка
Макроструктура
Зона термического влияния
Плавнение металла
Параметры резки
Ток обратной полярности
Толстолистовой прокат

Финансирование

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание производства высокотехнологичного оборудования адаптивной высокоточной плазменной резки цветных металлов больших толщин для металлургической, авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 06.04.2022 № 075-11-2022-012), реализуемого ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034) и ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН.

АННОТАЦИЯ

Во введении описана целесообразность применения плазменной резки на токе обратной полярности для получения крупногабаритных заготовок цветных металлов толщиной до 100 мм. Приведены данные по применению плазменной резки на токе прямой и обратной полярности толстолистового проката и по основным технологическим проблемам, связанным с ее осуществлением. **Цель работы:** исследование организации структуры и свойств приповерхностной зоны, а также изменений химического и фазового состава при резке алюминиевых, медных и титановых сплавов. **Методами исследования** являются оптическая и растровая электронная микроскопия, измерение микротвердости, рентгеноструктурный и энергодисперсионный анализ. Плазменную резку осуществляли при использовании в качестве плазмообразующего и защитного газа воздуха одновременно со впрыском воды в разрядную камеру и формированием вокруг плазменного столба «водяного тумана». **Результаты и обсуждение.** Показано, что при плазменной резке листового проката на токе обратной полярности большое значение имеет как стабильность горения дуги, так и форма плазменного столба. Искажение геометрии реза при работе в штатном режиме максимально в центральной части, а при недостаточном тепловложении смещается в нижнюю часть и значительно возрастает. Работа плазматрона на воздухе не приводит к существенным изменениям состава поверхности реза алюминиевого и медного сплавов. Для алюминниевового сплава в поверхностных слоях характерно снижение содержания магния вблизи кромки. Резка титанового сплава сопровождается интенсивным окислением поверхности, особенно в областях затрудненного вытеснения металла из полости реза. Формирование оксидов титана, преимущественно рутила Ti_2O_3 , резко повышает значения микротвердости в поверхностных слоях, что негативно влияет на обрабатываемость кромки реза и требует проведения дробеструйной обработки для удаления оксидного слоя. **В заключении** описаны основные закономерности реализации плазменной резки на токе обратной полярности листового проката алюминиевых, медных и титановых сплавов толщиной 100 мм.

Для цитирования: Искажение геометрии, окисление кромки, структурные изменения и морфология поверхности реза листового проката толщиной 100 мм из алюминиевых, медных и титановых сплавов при плазменной резке на токе обратной полярности / А.В. Гриненко, А.В. Чумаевский, Е.А. Сидоров, В.Р. Утяганова, А.И. Амиров, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 41–56. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-41-56.

*Адрес для переписки

Чумаевский Андрей Валерьевич, д.т.н., в.н.с.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Академический проспект, 2/4,
634055, Томск, Россия
Тел.: 8 (382) 228-68-63, e-mail: tch7av@ispms.ru

Введение

В настоящее время перед отечественной промышленностью остро стоит задача, связанная с высокопроизводительным производством заготовок из цветных металлов и сплавов для изготовления крупногабаритных изделий и конструкций. Газопламенная и гидроабразивная резка позволяют резать толстолистовой прокат, но обладают низкой производительностью [1–3]. Лазерная резка имеет высокую производительность, но не позволяет получать заготовки большой толщины [4, 5]. Применяемые виды механической резки металлов не обладают нужной гибкостью для производства изделий сложной формы.

Одновременно высокой производительностью и возможностью получать заготовки из толстолистового проката обладает плазменная резка [6–8]. Этот метод хорошо подходит как для сталей и черных металлов [9, 10], так и для медных, алюминиевых и титановых сплавов [11–16]. Плазменной резкой возможно получение заготовок из толстолистового проката, в том числе толщиной 100 мм и более. Однако резка заготовок такой толщины при использовании плазматронов, работающих на токе прямой полярности, является достаточно затруднительной и сопровождается значительным износом рабочих элементов [17, 18]. К тому же основные имеющиеся на рынке плазматроны данного типа зарубежного производства и не выпускаются отечественными предприятиями. В связи с этим требуется разработка альтернативных существующим средств плазменной резки отечественного производства. Для этих целей в настоящее время в рамках совместного проекта ИФПМ СО РАН и ООО «ИТС-Сибирь» происходит разработка оборудования для плазменной резки толстолистового проката цветных металлов и сплавов больших толщин на токе обратной полярности [13–16, 18, 19].

Резка на токе обратной полярности обладает рядом преимуществ в сравнении с прямой полярностью. В первую очередь снижается расход сопел и электродов, входящих в состав плазматронов [17, 18]. Вторым, но не менее важным фактором, является увеличение возможной к резке толщины листового проката [15]. Плазменная резка на токе обратной полярности обла-

дает большей производительностью при равной мощности в сравнении с прямой полярностью [18, 20–23]. Дополнительно повышается качество поверхности реза и снижается степень структурных изменений от термического воздействия [18]. В то же время плазменная резка более сложна и по отработке режимов [13–16], и по характерным особенностям деградации и износа рабочих элементов плазматрона [18].

Несмотря на достаточно длительное время использования плазменной резки, в современной литературе практически отсутствует информация о влиянии процесса резки на структуру и качество поверхности реза листового проката толщиной 100 мм и более при использовании плазматронов, работающих на токе обратной полярности.

Целью настоящей работы является изучение организации структуры, искажения кромки, изменения химического и фазового состава при плазменной резке на токе обратной полярности алюминиевых, медных и титановых сплавов.

Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились на производственном участке в ООО «ИТС-Сибирь» и на экспериментальном оборудовании в ИФПМ СО РАН. Процесс резки выполнялся на плазматроне с обратной полярностью, разрабатываемом в процессе проведения совместного научно-технического проекта. В качестве материала использовали плиты толщиной 100 мм из алюминиевого сплава АМг6, бронзы БрАМц9-2 и титанового сплава ВТ22 в состоянии поставки. Схема работы плазматрона и процесса плазменной резки приведена на рис. 1, а.

Резку плит 1 толщиной 100 мм производили плазменной струей 2, формируемой в среде защитного газа 3 за счет горения пусковой дуги 4 на старте процесса и рабочей дуги 5 непосредственно на рабочем режиме. Подачу защитного и плазмообразующего газа 6 в зону резки производили при фиксированном давлении в системе. Сопло 7 фиксировали гайкой 8. В сопле происходило формирование плотной вихревой струи газа и плазмы 9, образующейся за счет завихрителя 10 и горения дуги. Дополнительно на плазматроне разрабатываемой конструкции производили впрыск воды 11 в разрядную ка-

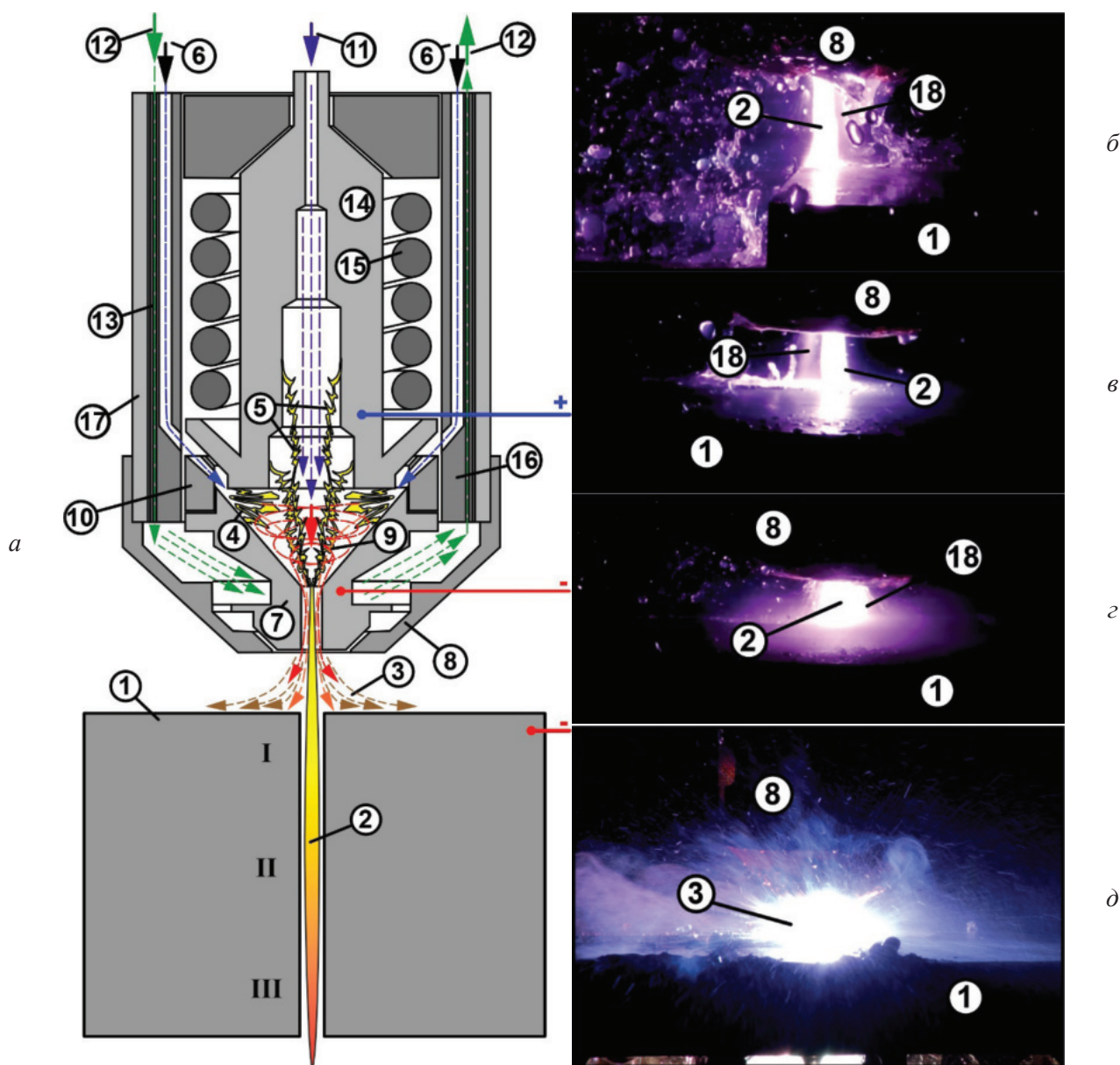


Рис. 1. Схема работы плазматрона на токе обратной полярности (а); внешний вид плазменной струи на старте (б) и в рабочем режиме (в); повышение плотности «водяного тумана» вокруг плазменной струи при работе (з); внешний вид зоны резки (д):

1 – плита; 2 – плазменная струя; 3 – поток газа; 4 – пусковая дуга; 5 – рабочая дуга; 6 – поток плазмообразующего и защитного газа; 7 – сопло; 8 – внешняя гайка; 9 – вихревые потоки газа и плазмы; 10 – завихритель; 11 – подача воды в полый электрод; 12 – подача охлаждающей воды в корпус плазматрона; 13 – каналы водяного охлаждения; 14 – электрод; 15 – соленоид; 16 – внутренний корпус из фторопласта; 17 – внешний стальной корпус; 18 – «водяной туман»

Fig. 1. Scheme of the reverse polarity plasma torch operation (a); the appearance of the plasma jet at start (б) and in the operating mode (в); an increase in the density of the “water mist” around the plasma jet (з); and the appearance of the cutting zone (д):

1 – plate; 2 – plasma jet; 3 – gas flow; 4 – starting arc; 5 – working arc; 6 – flow of plasma-forming and protective gas; 7 – nozzle; 8 – external nut; 9 – vortex flows of gas and plasma; 10 – swirler; 11 – water supply to the hollow electrode; 12 – supply of cooling water to the plasma torch body; 13 – water cooling channels; 14 – electrode; 15 – solenoid; 16 – inner casing made of PTFE; 17 – outer steel casing; 18 – “water mist”

меру через отверстие в рабочем электроде 14. Такое положение требовалось для повышения качества реза и снижения износа сопла и электрода [16, 18, 19]. Во избежание перегрева сопла и электрода обеспечивали постоянный поток воды 12 через каналы в корпусе 13. За счет особенностей конструкции плазмотрона поток 13 сначала проходил через сопло и электрод, потом частично на выход из корпуса, а частично в разрядную камеру. Подвод тока к электроду осуществляли через медный соленоид 15, дополнительно формирующий магнитное поле для фокусирования потока плазмы и электрической дуги. Внутренний корпус плазмотрона 16 с каналами подачи воды и воздуха изготовлен из фторопласта, а внешний корпус 17 – из стали. Рабочий электрод 14 и сопло 7 изготовлены из меди марки М1.

На старте процесса расстояние между плазмотроном и плитой увеличивали (рис. 1, б), а после стабилизации процесса горения дуги снижали (рис. 1, в). При резке «водяной туман» вокруг плазменной струи значительно изменялся за счет пульсации давления в разрядной камере (рис. 1, в, г). Вокруг зоны реза формировалось большое количество продуктов горения металла, вытесняемых потоком защитного газа (рис. 1, д). Ток электрической дуги при резке составлял от 350 до 370 А, напряжение – от 370 до 400 В, высота плазмотрона над поверхностью плиты при резке – от 16 до 25 мм. Давление газа составляло от 2,0 до 4,0 бар, давление воды в системе до входа в контур охлаждения плазмотрона – 6 бар, зазор между соплом и электродом – от 0,5 до 2,0 мм. Скорость резки – от 250 до 3000 мм/мин. В качестве плазмообразующего и защитного газа использовали воздух.

После получения экспериментальных образцов из них электроэрозионным методом (на станке DK7750) производили вырезку металлографических шлифов для структурных исследований. Исследования структуры и морфологии поверхности реза производили на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ 1С», лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT 4100 и растровом электронном микроскопе Zeiss LEO EVO 50, совмещенном с системой для микро-рентгеноспектрального анализа. Искажение геометрии реза определяли по максимальному отклонению поверхности реза от перпендику-

лярности с помощью макроструктурных изображений, полученных методом оптической микроскопии.

Результаты и их обсуждение

В ходе плазменной резки плит толщиной 100 мм формировалась специфическая структура вблизи поверхности реза и характерный для плазменной резки макрорельеф (рис. 2). На поверхности реза алюминиевого сплава и бронзы присутствует большое количество следов течения металла по поверхности кромки в процессе резки (рис. 2, а, в). Поверхность реза титанового сплава не проявляет настолько выраженных следов течения металла и характеризуется наличием микротрещин (рис. 2, д).

Наиболее выражено искажение кромки реза алюминиевого и медного сплавов в центральной части (II на рис. 2, б, г), для титанового сплава – в нижней части кромки (III на рис. 2, д). Наиболее грубый рельеф для образцов всех сплавов наблюдается в нижней части пластины (III), а наиболее однородной является верхняя часть реза (I). В структуре приповерхностной зоны образцов всех трех типов можно выделить области оплавленного металла, зону термического влияния и основной металл с неизменной структурой. Наименее подвержена термическому воздействию структура бронзы БрАМц9-2, наибольшая величина зоны термического влияния отмечается для сплава ВТ22, а для сплава АМгб характерна большая толщина зоны оплавленного металла. Как будет показано далее, такое положение обусловлено термическими условиями, составом сплавов, их температурой плавления и теплопроводностью.

Поверхность алюминиевого сплава АМгб после резки проявляет различное строение в верхней, центральной и нижней частях реза (рис. 3, а–в). Более равномерной является верхняя часть, а в нижней содержится большее количество пор и следов окисления. При исследовании микроструктуры выявляется формирование микротрещин (1 на рис. 3, г) и мелких пор сферической формы (2 на рис. 3, г). По данным энергодисперсионного анализа (ЭДС), в поверхностных слоях присутствует достаточно большое количество кислорода. В структуре поверхностного слоя (рис. 4, а–д) выделяются

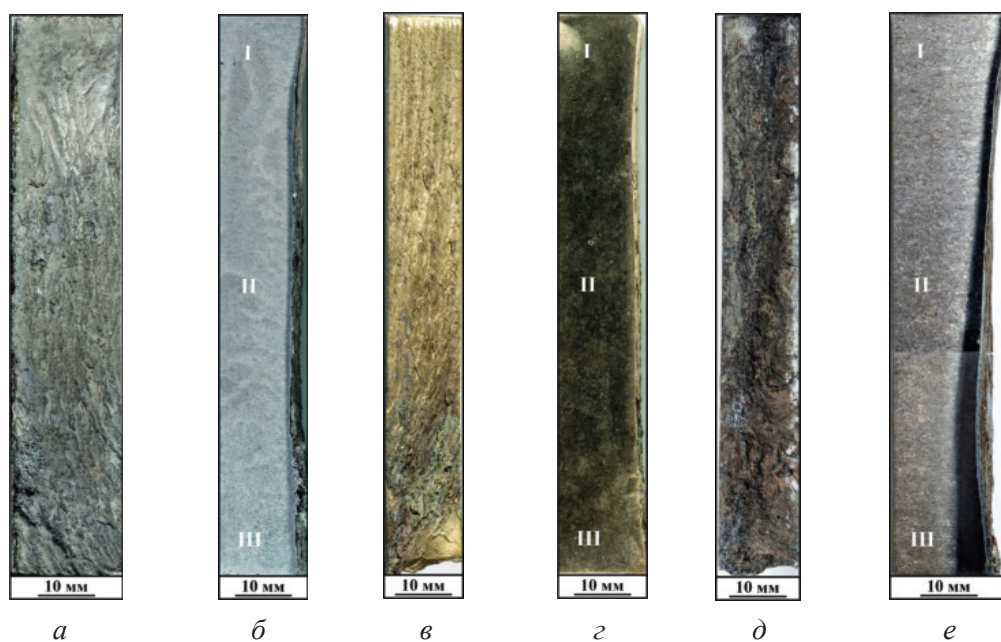


Рис. 2. Поверхность реза (а, в, д) и макроструктура в поперечном сечении (б, з, е) образцов алюминиевого сплава АМгб (а, б), бронзы БрАМц9-2 (в, з) и титанового сплава ВТ22 (д, е) после плазменной резки на токе обратной полярности

Fig. 2. The cut surface (a, в, д) and the macrostructure in the cross section (б, з, е) of specimens of aluminum alloy *Al-6 Mg* (a, б), bronze *Cu-9 Al-2 Mn* (в, з) and titanium alloy *Ti-5 Al-5 Mo-5 V* (д, е) after reverse polarity plasma cutting

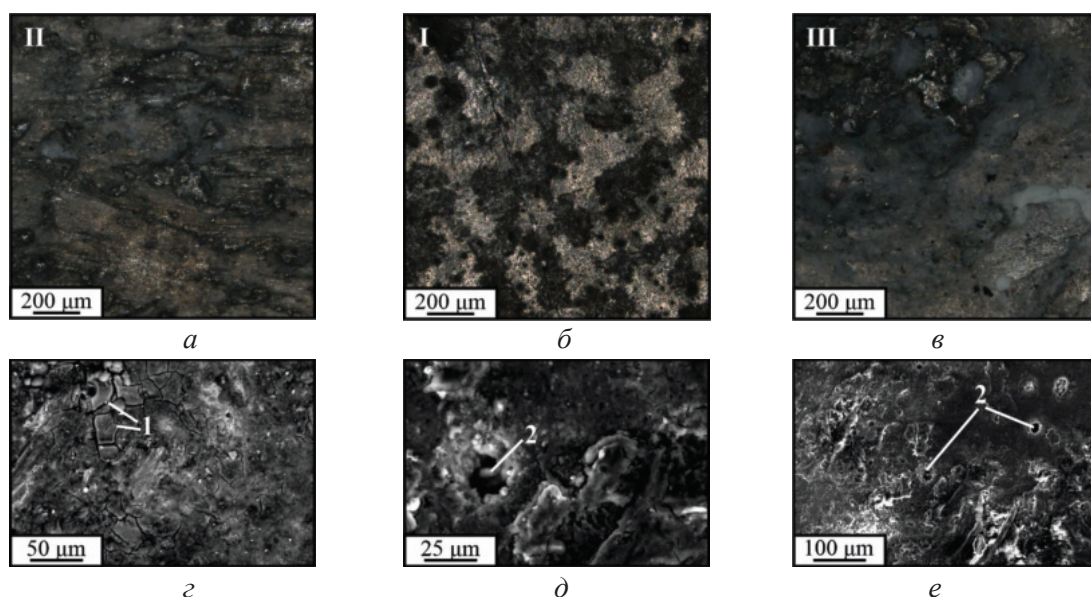


Рис. 3. Изображения поверхности реза алюминиевого сплава АМгб, полученные методом лазерной сканирующей (а–в) и растровой электронной микроскопии (г–е)

Fig. 3. Images of the cut surface of aluminum alloy *Al-6 Mg* obtained by laser scanning (a–в) and scanning electron (г–е) microscopy

зона плавления (ЗП), зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Глубина ЗТВ и ОМ преимущественно не превышает 1 мм в центральной части. Зона плавления содержит большое количество крупных частиц вторичных фаз (1 на рис. 4, з), пор (2 на рис. 4, е, ж) и не-

сплошностей (3 на рис. 4, ж). По данным ЭДС-анализа, в зоне плавления содержится лишь небольшое количество кислорода, но значительно изменяется содержание магния, что представлено на рис. 5, б. Выгорание магния для сплавов типа АМгб является ожидаемым и наблюдается

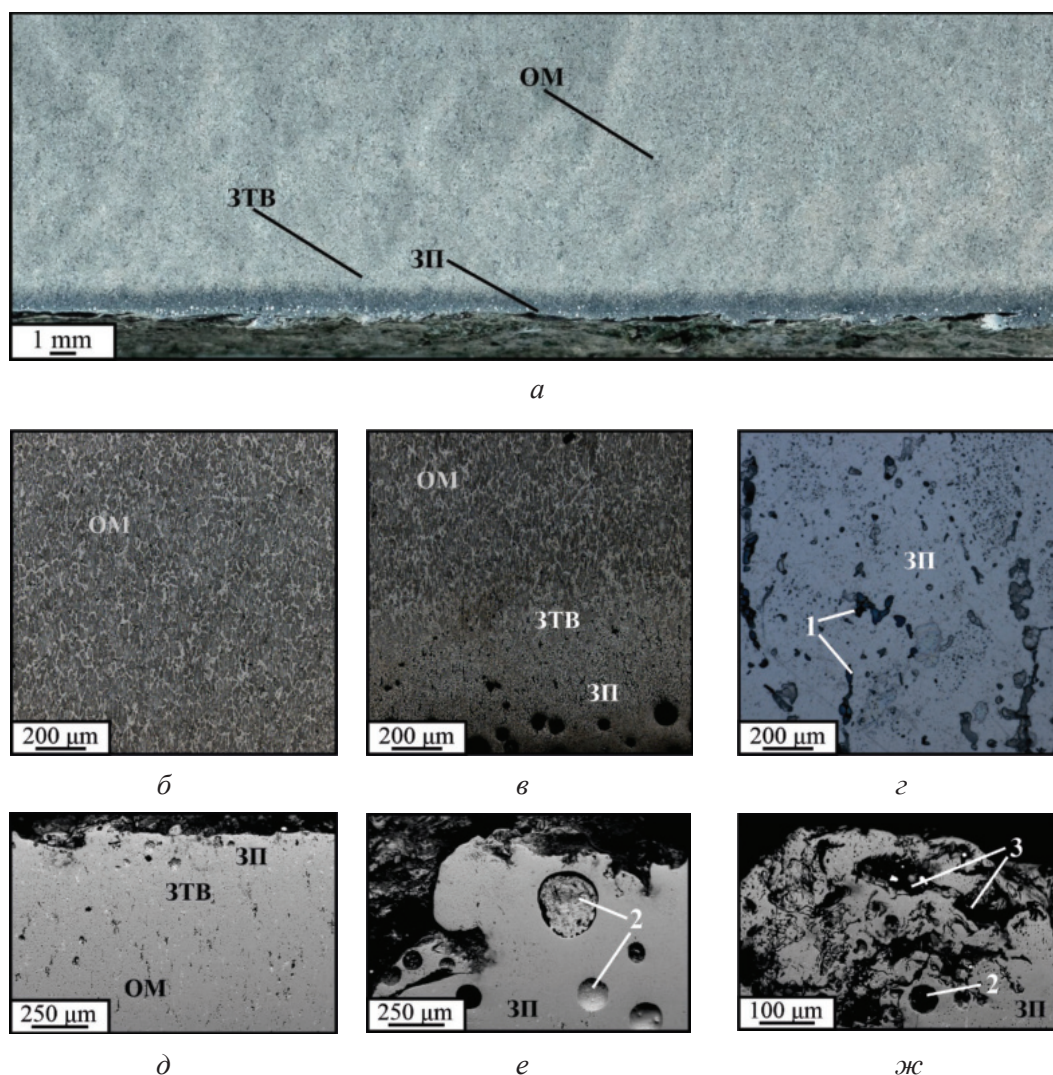


Рис. 4. Макроструктура (а); изображения микроструктуры, полученные методами оптической микроскопии (б–г) и растровой электронной микроскопии (д–ж), образца алюминиевого сплава АМг6

Fig. 4. Macrostructure (a), images of the microstructure obtained by optical (б–г) and scanning electron (д–ж) microscopy of a specimen of aluminum alloy Al-6 Mg

в том числе и при сварке различными методами. По данным рентгеноструктурного анализа (РСА), в поверхностных слоях изменения фазового состава не происходит, структура представлена Al(Mg) (рис. 5, в, г).

Из-за снятия наклепа и выгорания магния в поверхностных слоях алюминиевого сплава происходит достаточно значительное снижение микротвердости, особенно в нижней части реза (рис. 5, а). Причем если в верхней части реза микротвердость уменьшается с 1,21 ГПа в основном металле до 1,01 ГПа в приповерхностной зоне, то в нижней части реза вблизи поверхности она составляет примерно 0,94 ГПа. В верхней и центральной частях реза на глубине 1,0 мм микротвердость уже достигает значений

основного металла, а в нижней части составляет 1,05 ГПа. Это показывает намного большее термическое влияние на материал в нижней части зоны реза, что обусловлено вытеснением всего расплавленного в полости реза металла через данную область и затруднением его выведения струей защитного газа. В целом ориентируясь на допуски размеров для производства заготовок из плит данной толщины, можно считать и искажение реза, и структурные изменения в нем приемлемыми.

На поверхности бронзы БрАМц9-2 после резки рельеф также существенно отличается в верхней, нижней и центральной частях зоны реза (рис. 6, а–в). Выделяются элементы, сформированные при быстром застывании металла,

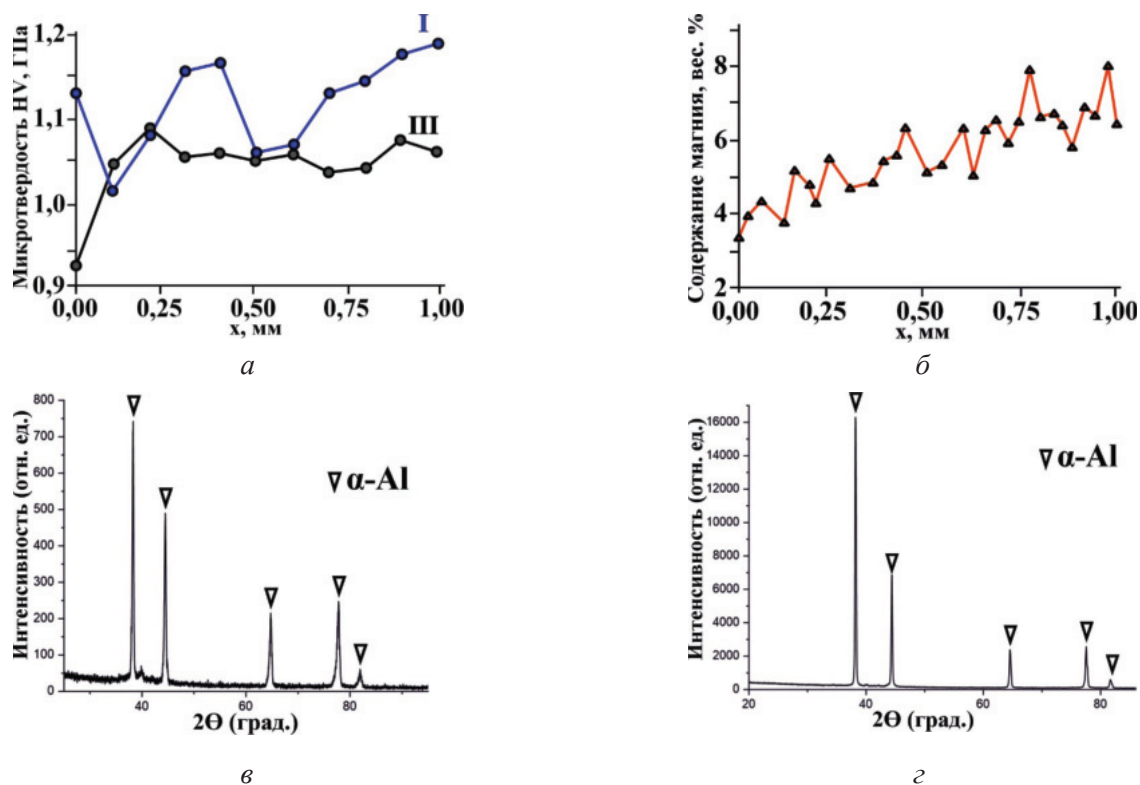


Рис. 5. Микротвердость (*a*); изменение содержания магния (*б*) в поверхностных слоях алюминиевого сплава АМг6; результаты рентгеновского анализа основного металла (*в*) и поверхности реза (*г*)

Fig. 5. Microhardness (*a*), change in magnesium content (*б*) in the surface layers of aluminum alloy Al-6 Mg and the results of X-ray analysis of the base metal (*в*) and the cut surface (*г*)

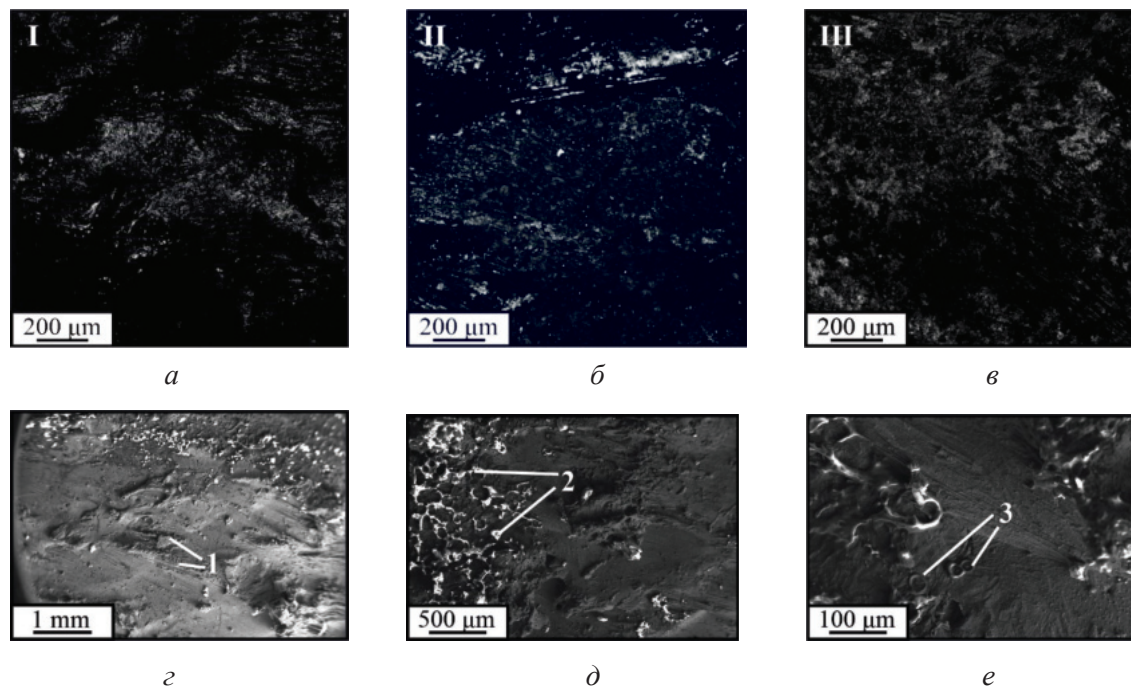


Рис. 6. Изображения поверхности реза бронзы БрАМц9-2, полученные методом лазерной сканирующей микроскопии (*a–в*) и растровой электронной микроскопии (*г–е*)

Fig. 6. Images of the cut surface bronze Cu-9 Al-2 Mn obtained by laser scanning (*a–в*) and scanning electron (*г–е*) microscopy

стекающего по поверхности кромки при резке (1 на рис. 6, з). По данным РЭМ и РСА, также присутствуют фрагменты оксидов (2 на рис. 6, д) и образования в виде пор или «кратеров» (3 на рис. 6, е). Окисление поверхности при этом фрагментарно и сплошного окисленного слоя не образуется.

В структуре поверхностного слоя также выделяются зона плавления, зона термического влияния и основной металл (рис. 7, а–з). В материале данных зон присутствуют поры (1 на рис. 7, д) и несплошности (2 на рис. 7, ж). Однако зона оплавленного металла при этом значительно меньше и в центральной части не превышает по толщине 100...200 мкм, а зона термического

влияния выделяется достаточно слабо (рис. 7, а–з, рис. 8, а). Значения микротвердости в поверхностных слоях практически не изменяются, что обусловлено высокой теплопроводностью материала и быстрым охлаждением. По этой причине, согласно данным РСА, в материале не происходит качественных изменений фазового состава (рис. 8, б, в). Основной фазой является твердый раствор $\text{Cu}(\text{Al})$ и β' -фаза (игольчатая Cu_3Al между зернами твердого раствора). В зоне плавления и термического влияния можно выделить только изменения объемной доли и содержания данных фаз (рис. 7, в, е). Присутствуют также вторичные фазы в виде частиц Cu_3Al по всему объему материала. Высокая теплопроводность материала

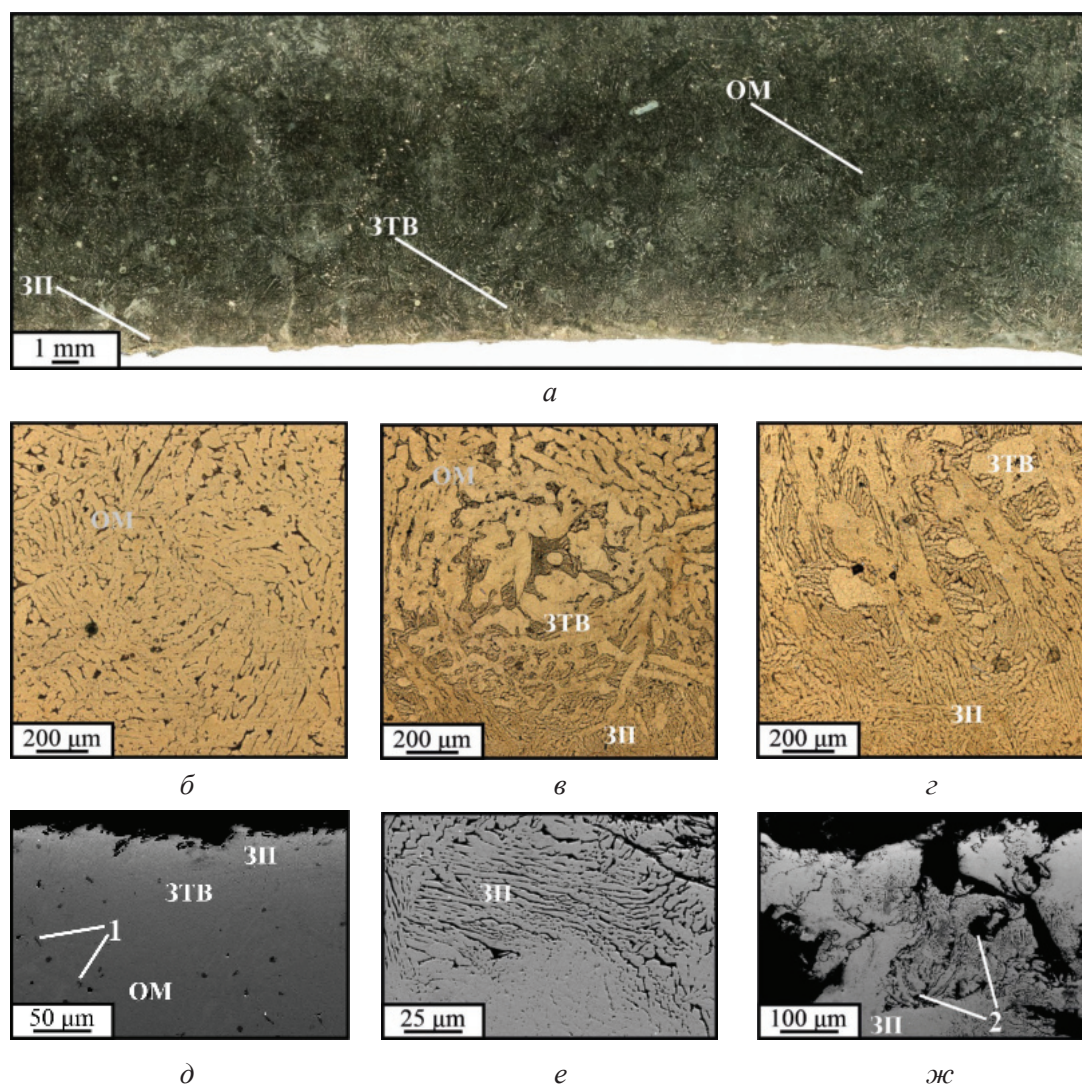


Рис. 7. Макроструктура (а); изображения микроструктуры, полученные методами оптической микроскопии (б–г) и растровой электронной микроскопии (д–ж), образца бронзы БрАМц9-2

Fig. 7. Macrostructure (а), images of the microstructure obtained by optical (б–г) and scanning electron (д–ж) microscopy of a specimen of bronze Cu-9 Al-2 Mn

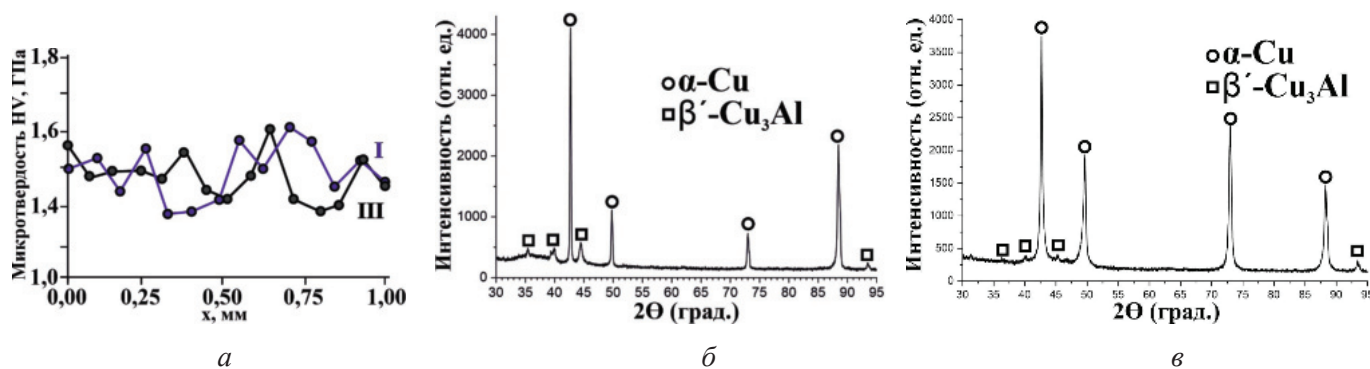


Рис. 8. Изменение микротвердости (а) в поверхностных слоях бронзы БрАМц9-2; результаты рентгеновского анализа основного металла (б) и поверхности реза (в)

Fig. 8. Change in microhardness in the surface layers of bronze *Cu-9 Al-2 Mn* (а); the results of X-ray analysis of the base metal (б) and the cut surface (в)

обуславливает меньшие структурные изменения в приповерхностной зоне, чем у алюминиевого сплава, но и большую долю не вытесненного из зоны реза материала в нижней части реза, что показано на рис. 2, в. В целом по анализу искажения геометрии и структурных изменений материала для плит данного размера качество реза можно считать приемлемым.

Морфология поверхности реза титанового сплава BT22 в верхней, нижней и центральной частях достаточно близка (рис. 9, а–в). Поверхностный рельеф в данном случае (в отличие от

медного и алюминиевого сплавов) слабо выявляет следы течения металла по контуру инструмента, хотя и имеются близкие по форме выступы в центральной части реза (1 на рис. 9, з). Основной причиной существенных отличий морфологии реза титанового сплава является окисление поверхности с формированием сплошного оксидного слоя, что подтверждается данными РЭМ и ЭДС-анализа (рис. 9, д, е). Основной вид оксида, по данным ЭДС и РСА-анализа, – Ti_2O (рис. 11, з). На поверхности слоя можно отметить наличие структур дендритного

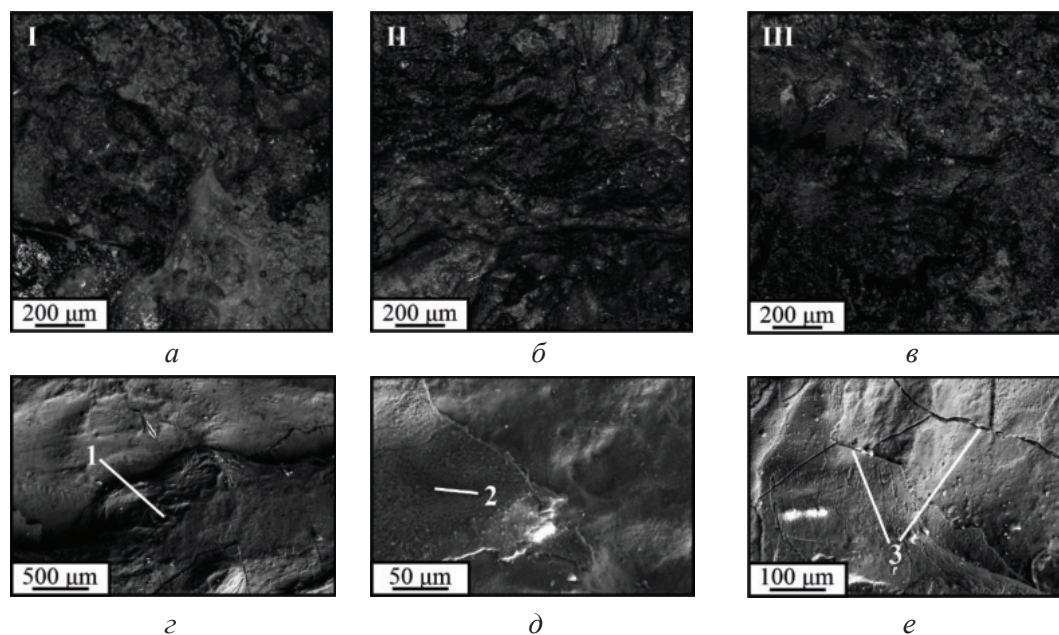


Рис. 9. Изображения поверхности реза титанового сплава BT22, полученные методом лазерной сканирующей микроскопии (а–в) и растровой электронной микроскопии (г–е)

Fig. 9. Images of the cut surface of titanium alloy *Ti-5 Al-5 Mo-5 V* obtained by laser scanning (а–в) and scanning electron (г–е) microscopy

типа, возникших при кристаллизации оксида (2 на рис. 9, *д*) и микротрещин (3 на рис. 9, *е*), формирование которых происходило при остывании материала после резки. Анализ структуры и химического состава материала показывает, что зона плавления подвержена окислению практически на всю глубину (рис. 10, *а*, рис. 11, *б*) вплоть до 0,5 мм в нижней части реза.

Металл в зоне резки также представлен зоной плавления, зоной термического влияния и основным металлом (рис. 10, *а–г*). В зоне плавления оксиды и титан формируют дендритные структуры. Зона основного металла и зона термического влияния представлены пластинами альфа- и бета-фазы, что подтверждается и оптической микроскопией (рис. 10, *б, в*), и данными РСА-анализа (рис. 11, *в, г*). Зона плавления содержит достаточно крупные трещины, практически на всю глубину (1 на рис. 10, *д*).

Вблизи поверхности в зоне плавления можно выделить наличие выступов (2 на рис. 10, *е*) и несплошностей (3 на рис. 10, *ж*). Из-за окисления материала в приповерхностных слоях выделяется резкий рост микротвердости (рис. 11, *а*). Наибольшее увеличение микротвердости вплоть до 8 ГПа происходит в нижней части зоны резки, глубина зоны составляет в данном случае более 1 мм. В верхней части реза и термическое влияние на материал, и окисление кромки значительно меньше, и глубина данных зон не превышает 0,3 мм.

Окисление материала титанового сплава в поверхностных слоях более существенное, чем для алюминиевого сплава, это обусловлено более высокой активностью титана и температурой плавления. В нижней части зоны реза при установленной мощности плазмообразующей дуги полное прохождение струей плазмы плиты

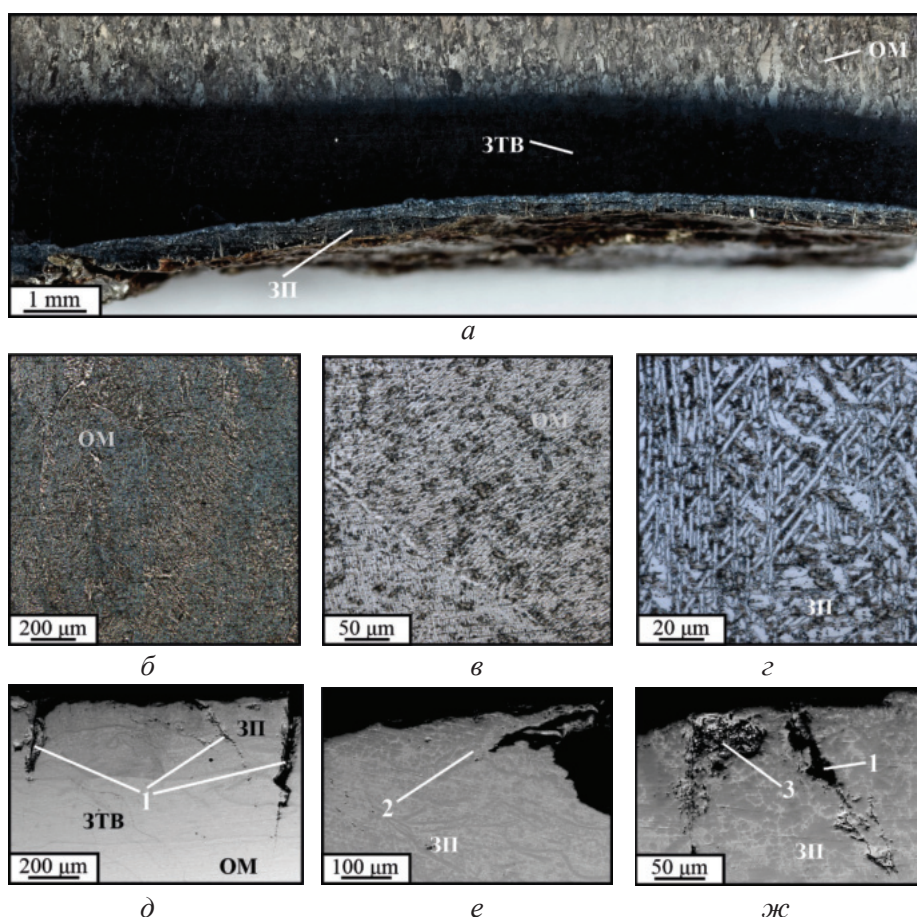


Рис. 10. Макроструктура (*а*) и изображения микроструктуры, полученные методами оптической микроскопии (*б–г*) и растровой электронной микроскопии (*д–ж*), образца титанового сплава BT22

Fig. 10. Macrostructure (*a*), images of the microstructure obtained by optical (*б–г*) and scanning electron (*д–ж*) microscopy of a specimen of titanium alloy Ti-5 Al-5 Mo-5 V

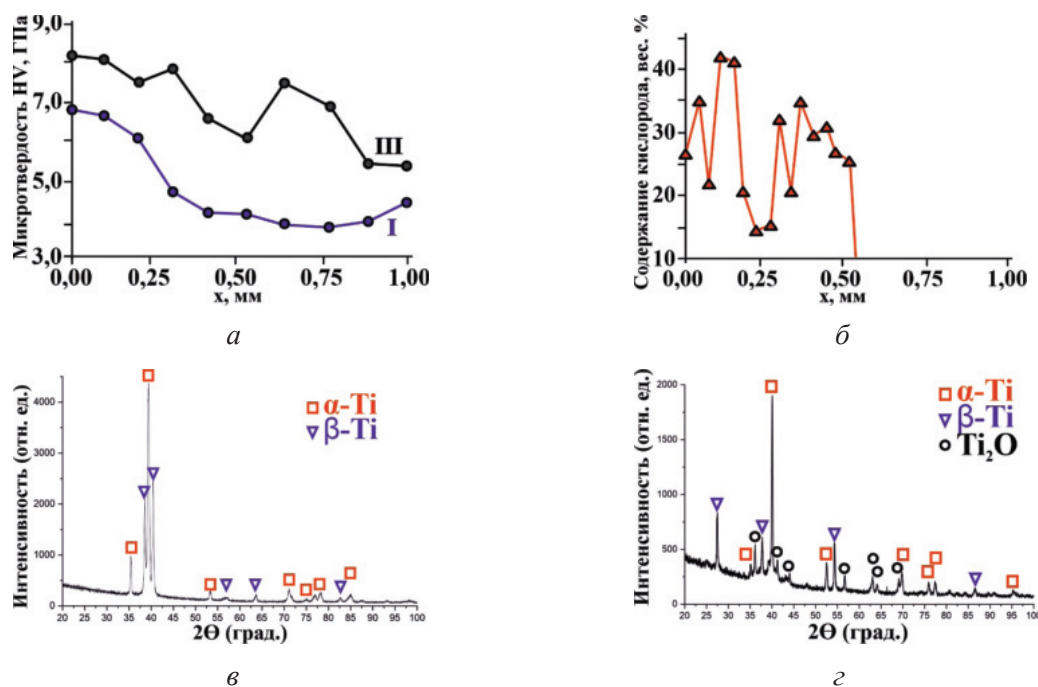


Рис. 11. Микротвердость (а); изменение содержания кислорода (б) в поверхностных слоях титанового сплава BT22; результаты рентгеновского анализа основного металла (в) и поверхности реза (г)

Fig. 11. Microhardness (а), change in oxygen content (б) in the surface layers of titanium alloy *Ti-5Al-5Mo-5V*, the results of X-ray analysis of the base metal (в) and the cut surface (г)

было затруднено, и на материал оказывалось более длительное термическое воздействие.

Можно установить, что рез в данном случае формировался на пределе возможности, на грани полного прорезания плиты и дефекта в виде непрореза. Это привело к более существенному окислению кромки в нижней части и ухудшению качества реза. В целом для механической обработки резанием заготовок титанового сплава это неприемлемо, и после плазменной резки требуется проведение дробеструйной обработки для удаления окалины. Возможно также использование азота в качестве защитного и плазмообразующего газа при резке, но для плит данной толщины характерно медленное остывание кромки, особенно для титанового сплава с достаточно низкой теплопроводностью, поэтому окисления кромки при недостаточном вытеснении металла из полости реза и избыточном оплавлении поверхности избежать не удастся. Однако повышение мощности источника плазмообразующей дуги и резка на несколько большем (400 А) токе могут позволить формировать рез на плите титанового сплава толщиной 100 мм приемлемого качества, в том числе и при использовании воздуха для плазмообразующего газа.

Закключение

Проведенные исследования показывают, что методом плазменной резки на токе обратной полярности возможно получение заготовок толщиной 100 мм из листового проката алюминиевых, медных и титановых сплавов. Наилучшее качество поверхности реза характерно для плит алюминиевого сплава АМг6 и бронзы БрАМц9-2. Для этих сплавов отмечаются небольшие изменения механических свойств и структуры в поверхностных слоях и невысокие значения искажений геометрии реза. Величина зоны со сниженным содержанием магния в алюминиевом сплаве не превышает 0,5 мм от поверхности реза, а в бронзе практически не происходит изменений химического состава. Для обоих сплавов характерно наличие кислорода только на поверхности реза без формирования слоя окислов. Качество реза титанового сплава BT22 значительно снижается. Из-за большей температуры плавления прорезание на всю глубину плиты несколько осложнено, и в нижней части плиты можно отметить значительное искажение кромки. На поверхности формируется достаточно крупный слой из окислов, внутри которого при остывании образуются

микротрещины. Это обуславливает требования к предварительной дробеструйной постобработке титанового сплава после резки с использованием плазмообразующего газа в виде воздуха или замена его азотом. Можно также отметить, что в верхней части зоны реза с оптимальными условиями вытеснения металла из полости реза оксидный слой достаточно невелик. Резка на воздухе с дополнительным впрыском воды для титанового сплава также может использоваться, но требует, предположительно, более высокой мощности дуги и давления газа.

Список литературы

1. A virtual sensing approach for quality and productivity optimization in laser flame cutting / N. Levichev, A. Tomás García, R. Dewil, J.R. Dufflou // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 121. – P. 6799–6810. – DOI: 10.1007/s00170-022-09750-8.
2. Influence of the parameters of chemical thermal treatment of copper slag particles on the quality of hydroabrasive cutting / G.V. Barsukov, M.F. Selemeney, T.A. Zhuravleva, I.N. Kravchenko, E.M. Selemeneyeva, O.V. Barmina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2023. – Vol. 52. – P. 679–686. – DOI: 10.1134/S1052618823070075.
3. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Quality of hydroabrasive waterjet cutting machinability // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1034–1038. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.590.
4. Optimizing process parameters of in-situ laser assisted cutting of glass-ceramic by applying hybrid machine learning models / J. Wei, W. He, C. Lin, J. Zhang, J. Chen, J. Xiao, J. Xu // *Advanced Engineering Informatics*. – 2024. – Vol. 62. – P. 102590. – DOI: 10.1016/j.aei.2024.102590.
5. Laser cutting of aluminum alloys using pulsed radiation from a CO₂ laser under conditions of an optical discharge in an argon jet / V.B. Shulyat'ev, M.A. Gulov, E.V. Karpov, A.G. Malikov, K.R. Boiko // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2023. – Vol. 50. – P. S1075–S1078. – DOI: 10.3103/S1068335623220116.
6. Electrical arc contour cutting based on a compound arc breaking mechanism / G.-J. He, L. Gu, Y.-M. Zhu, J.-P. Chen, W.-S. Zhao, K.P. Rajurkar // *Advances in Manufacturing*. – 2022. – Vol. 10 (4). – P. 583–595. – DOI: 10.1007/s40436-022-00406-0.
7. Sharma D.N., Kumar J.R. Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 32. – P. 354–357. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
8. Ilii S.M., Coteata M. Plasma arc cutting cost // *International Journal of Material Forming*. – 2009. – Vol. 2. – P. 689–692. – DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
9. Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q. Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: a review // *Jurnal Kejuruteraan*. – 2018. – Vol. 30. – P. 7–16. – DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-01.
10. Performance analysis of conventional and high-feed turning tools in machining the thermally affected zone after plasma arc cutting of low carbon manganese-alloyed steel / M.B. Barcelos, D.T. de Almeida, F. Tuset, C.J. Scheuer // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 115. – P. 18–39. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.08.
11. Akkurt A. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2015. – Vol. 18 (3). – P. 303–308. – DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.004.
12. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 160. – P. 77–89. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
13. Structural features and morphology of surface layers of AA2024 and AA5056 aluminum alloys during plasma cutting / A.V. Grinenko, E.O. Knyazhev, A.V. Chumaevskii, A.V. Nikolaeva, A.O. Panfilov, A.M. Cheremnov, L.L. Zhukov, A.V. Gusarova, P.S. Sokolov, D.A. Gurianov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // *Russian Physics Journal*. – 2023. – Vol. 66. – P. 925–933. – DOI: 10.1007/s11182-023-03025-9.
14. Отработка методики плазменной резки меди марки М1, алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 с использованием плазмотрона с обратной полярностью / В.Е. Рубцов, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, А.В. Гусарова, В.А. Белобородов, А.В. Чумаевский, А.Н. Иванов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 33–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-33-52.
15. Закономерности износа плазмотронов при плазменной резке толстолистового проката на токе обратной полярности / Е.А. Сидоров, А.В. Гриненко, А.В. Чумаевский, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, В.Е. Рубцов, В.Р. Утяганова, К.С. Осипович, Е.А. Колубаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 149–162. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-149-162.
16. Structure formation in surface layers of aluminum and titanium alloys during plasma cutting / A.V. Chumaevskii, A.V. Nikolaeva, A.V. Grinenko, A.O. Panfilov, E.O. Knyazhev, A.M. Cheremnov, V.R. Utyaganova, V.A. Beloborodov, P.S. Sokolov,



D.A. Gurianov, E.A. Kolubaev // *Physical Mesomechanics*. – 2023. – Vol. 26. – P. 711–721. – DOI: 10.1134/S1029959923060103.

17. *Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E.* Plasma torches for cutting, welding and PTA coating // *Handbook of Thermal Plasmas*. – Cham: Springer, 2023. – DOI: 10.1007/978-3-319-12183-3_47-2.

18. Influence of reverse-polarity plasma cutting parameters on structure and surface roughness of aluminum alloys / A. Grinenko, A. Chumaevsky, E.O. Knjazhev, D.A. Gurianov, E.A. Sidorov, E.A. Kolubaev // *Russian Physics Journal*. – 2024. – Vol. 67 (9). – P. 1287–1293. – DOI: 10.1007/s11182-024-03246-6.

19. Влияние высокоэнергетического воздействия при плазменной резке на структуру и свойства поверхностных слоёв алюминиевых и титановых сплавов / В.Е. Рубцов, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, А.В. Гусарова, В.А. Белобородов, А.В. Чумаевский, А.В. Гриненко, Е.А. Колубаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 4. –

C. 216–231. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-216-231.

20. *Shchitsyn V.Yu., Yazovskikh V.M.* Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma torch // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16 (6). – P. 485–487. – DOI: 10.1080/09507110209549563.

21. *Matushkina I., Anakhov S., Pyckin Yu.* Design of a new gas-dynamic stabilization system for a metal-cutting plasma torch // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2094. – P. 042075. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042075.

22. *Kudrna L., Fries J., Merta M.* Influences on plasma cutting quality on CNC machine // *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. – 2019. – Vol. 2 (1). – P. 108–117. – DOI: 10.2478/mape-2019-0011.

23. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining / M. Gostimirović, D. Rodic, M. Sekulić, A. Aleksic // *Advanced Technologies & Materials*. – 2020. – Vol. 45 (1). – P. 1–8. – DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



Geometry distortion, edge oxidation, structural changes and cut surface morphology of 100mm thick sheet product made of aluminum, copper and titanium alloys during reverse polarity plasma cutting

Artem Grinenko^{1, a}, Andrey Chumaevsky^{2, b, *}, Evgeny Sidorov^{2, c}, Veronika Utyaganova^{2, d},
 Alihan Amirov^{2, e}, Evgeniy Kolubaev^{2, f}

¹ ITS-Siberia LLC, Krasnoyarsk, 16a Severnoe shosse, 660118, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>, giga2011@yandex.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0009-0009-2665-7514>, eas@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-2303-8015>, veronika_ru@ispms.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-5143-8235>, amir@ispms.tsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 September 2024

Revised: 01 October 2024

Accepted: 10 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Plasma cutting

Macrostructure

Heat-affected zone

Metal melting

Cutting parameters

Reverse polarity current

Thick sheet metal

Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project “Establishment of production of high-tech equipment for adaptive high-precision plasma heavy cutting of non-ferrous metals for the metallurgical, aerospace and transport industries of the Russian Federation” (Agreement No. 075-11-2022-012 dated April 06, 2022) implemented by the ISPMS SB RAS at the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials” and center “Nanotech” ISPMS RAS.

ABSTRACT

The introduction describes the feasibility of using reverse polarity plasma cutting to produce large-sized non-ferrous metal blanks up to 100 mm thick. Data on the use of plasma cutting with direct and reverse polarity currents for thick sheet metal and the main technological problems associated with its implementation are presented. **The purpose of the work** is to study the organization of the structure and properties of the near-surface zone, changes in the chemical and phase composition when cutting aluminum, copper and titanium alloys. The research methods are optical and scanning electron microscopy, microhardness measurement, X-ray diffraction and energy-dispersive analysis. Plasma cutting was carried out using air as a plasma-forming and shielding gas, simultaneously with water injection into the discharge chamber and the formation of a “water fog” around the plasma column. **Results and discussion.** It is shown that both the arc stability and the shape of the plasma column are of great importance in reverse polarity plasma cutting of rolled sheets. The distortion of the cutting geometry during normal operation is greatest in the central part, and with insufficient heat input it shifts to the lower part and increases significantly. The operation of the plasma torch in air does not lead to significant changes in the composition of the cutting surface of aluminum and copper alloys. A decrease in the magnesium content near the edge is typical for the aluminum alloy in the surface layers. Cutting of the titanium alloy is accompanied by intense oxidation of the surface, especially in areas of difficult metal displacement from the cutting cavity. The formation of titanium oxides, mainly rutile Ti_2O_3 , sharply increases the microhardness values in the surface layers, which negatively affects the machinability of the cutting edge and requires shot blasting to remove the oxide layer. **The conclusion** describes the main patterns of implementing reverse polarity plasma cutting of sheet metal from aluminum, copper and titanium alloys with a thickness of 100 mm.

For citation: Grinenko A.V., Chumaevsky A.V., Sidorov E.A., Utyaganova V.R., Amirov A.I., Kolubaev E.A. Geometry distortion, edge oxidation, structural changes and cut surface morphology of 100mm thick sheet product made of aluminum, copper and titanium alloys during reverse polarity plasma cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 41–56. DOI:10.17212/1994-6309-2024-26.4-41-56. (In Russian).

* Corresponding author

Chumaevsky Andrey V., D.Sc. (Engineering), Leading researcher,
 Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
 2/4, pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (382) 228-68-63, e-mail: tch7av@ispms.ru

References

1. Levichev N., Tomás García A., Dewil R., Duflou J.R. A virtual sensing approach for quality and productivity optimization in laser flame cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121, pp. 6799–6810. DOI: 10.1007/s00170-022-09750-8.
2. Barsukov G.V., Selemenov M.F., Zhuravleva T.A., Kravchenko I.N., Selemenova E.M., Barmina O.V. Influence of the parameters of chemical thermal treatment of copper slag particles on the quality of hydroabrasive cutting. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2023, vol. 52, pp. 679–686. DOI: 10.1134/S1052618823070075.
3. Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O. Quality of hydroabrasive waterjet cutting machinability. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1034–1038. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.590.
4. Wei J., He W., Lin C., Zhang J., Chen J., Xiao J., Xu J. Optimizing process parameters of in-situ laser assisted cutting of glass-ceramic by applying hybrid machine learning models. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, vol. 62, p. 102590. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102590.
5. Shulyat'ev V.B., Gulov M.A., Karpov E.V., Malikov A.G., Boiko K.R. Laser cutting of aluminum alloys using pulsed radiation from a CO₂ laser under conditions of an optical discharge in an argon jet. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, pp. S1075–S1078. DOI: 10.3103/S1068335623220116.
6. He G.-J., Gu L., Zhu Y.-M., Chen J.-P., Zhao W.-S., Rajurkar K.P. Electrical arc contour cutting based on a compound arc breaking mechanism. *Advances in Manufacturing*, 2022, vol. 10 (4), pp. 583–595. DOI: 10.1007/s40436-022-00406-0.
7. Sharma D.N., Kumar J.R. Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 32, pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
8. Ilii S.M., Coteata M. Plasma arc cutting cost. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, pp. 689–692. DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
9. Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q. Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: a review. *Jurnal Kejuruteraan*, 2018, vol. 30, pp. 7–16. DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-01.
10. Barcelos M.B., Almeida D.T. de, Tusset F., Scheuer C.J. Performance analysis of conventional and high-feed turning tools in machining the thermally affected zone after plasma arc cutting of low carbon manganese-alloyed steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 115, pp. 18–39. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.08.
11. Akkurt A. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, vol. 18 (3), pp. 303–308. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.004.
12. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160, pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
13. Grinenko A.V., Knyazhev E.O., Chumaevskii A.V., Nikolaeva A.V., Panfilov A.O., Cheremnov A.M., Zhukov L.L., Gusarova A.V., Sokolov P.S., Gurianov D.A., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structural features and morphology of surface layers of AA2024 and AA5056 aluminum alloys during plasma cutting. *Russian Physics Journal*, 2023, vol. 66, pp. 925–933. DOI: 10.1007/s11182-023-03025-9.
14. Rubtsov V.E., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Gusarova A.V., Beloborodov V.A., Chumaevskii A.V., Ivanov A.N. Development of plasma cutting technique for C1220 copper, AA2024 aluminum alloy, and Ti-1.5Al-1.0Mn titanium alloy using a plasma torch with reverse polarity. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 33–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-33-52.
15. Sidorov E.A., Grinenko A.V., Chumaevsky A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Rubtsov V.E., Utyaganova V.R., Osipovich K.S., Kolubaev E.A. Patterns of reverse-polarity plasma torches wear during cutting of thick rolled sheets. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 149–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-149-162.
16. Chumaevskii A.V., Nikolaeva A.V., Grinenko A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Cheremnov A.M., Utyaganova V.R., Beloborodov V.A., Sokolov P.S., Gurianov D.A., Kolubaev E.A. Structure formation in surface layers of aluminum and titanium alloys during plasma cutting. *Physical Mesomechanics*, 2023, vol. 26, pp. 711–721. DOI: 10.1134/S1029959923060103.
17. Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E. Plasma torches for cutting, welding and PTA coating. *Handbook of thermal plasmas*. Cham, Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-319-12183-3_47-2.
18. Grinenko A.V., Chumaevskii A.V., Knjazhev E.O., Gurianov D.A., Sidorov E.A., Kolubaev E.A. Influence of reverse-polarity plasma cutting parameters on structure and surface roughness of aluminum alloys. *Russian Physics Journal*, 2024, vol. 67 (9), pp. 1287–1293. DOI: 10.1007/s11182-024-03246-6.

19. Rubtsov V.E., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Gusarova A.V., Beloborodov V.A., Chumaevskii A.V., Grinenko A.V., Kolubaev E.A. Influence of high-energy impact during plasma cutting on structure and properties of surface layers of aluminum and titanium alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 216–231. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-216-231.

20. Shchitsyn V.Yu., Yazovskikh V.M. Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma torch. *Welding International*, 2002, vol. 16 (6), pp. 485–487. DOI: 10.1080/09507110209549563.

21. Matushkina I., Anakhov S., Pyckin Yu. Design of a new gas-dynamic stabilization system for a metal-cutting plasma torch. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2094, p. 042075. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042075.

22. Kudrna L., Fries J., Merta M. Influences on plasma cutting quality on CNC machine. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2019, vol. 2 (1), pp. 108–117. DOI: 10.2478/mape-2019-0011.

23. Gostimirović M., Rodić D., Sekulić M., Aleksic A. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining. *Advanced Technologies & Materials*, 2020, vol. 45 (1), pp. 1–8. DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.

Conflicts of Interest

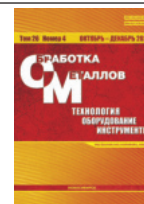
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Сравнительная оценка накатывания роликом сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости

Авинаш Соматкар^{1, 2, a}, Раши Диведи^{2, b}, Сатиш Чинчаникар^{3, c, *}

¹ Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Махараштра, Пуне – 411048, Индия

² Университет технологий и медицинских наук Шри Сатя Сан, Сехор, Мадхья-Прадеш, 466001, Индия

³ Технологический институт Вишвакармы, Махараштра, Пуне – 411037, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-2885-2104>, avinash.somatkar@viit.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-9755-5330>, rashmidivedi29@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchanikar@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787

История статьи:

Поступила: 30 сентября 2024

Рецензирование: 10 октября 2024

Принята к печати: 14 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Накатывание роликами

Сплав Al6061-T6

Наножидкость

Минимальное количество смазки (MQL)

Оптимизация

АННОТАЦИЯ

Введение. Накатывание роликом является одним из самых популярных методов улучшения качества поверхности заготовки, повышения ее износостойкости, микротвердости и коррозионной стойкости. В процессе обработки заготовка сжимается и разглаживается под давлением закаленного ролика. **Цель работы.** Результаты исследований показывают, что внедрение минимального количества смазки (MQL) во время накатывания роликом дает возможность повысить эффективность процесса за счет снижения трения и улучшения смазывания. Исследования показали, что использование наножидкостей в условиях MQL улучшает производительность обработки. Однако накатыванию роликом сплава Al6061-T6 в условиях смазки минимальным количеством наножидкости (NFMQL) уделялось очень мало внимания. **Методы исследования.** В свете этого в данном исследовании сравнили эффективность накатки роликами сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости. Микротвердость, отклонение от круглости и шероховатость поверхности оценены, смоделированы и оптимизированы в исследовании с учетом скорости вращения заготовки, подачи и количества проходов. На основе экспериментальных результатов созданы математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и изменения отклонения от круглости. **Результаты и обсуждение.** Для разработанных моделей шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости наблюдается значение R-квадрата выше 0,9, что позволяет уверенно использовать эти модели для прогнозирования исследуемых откликов в условиях сухого трения и в условиях NFMQL в пределах области параметров, выбранных в настоящей работе. Согласно этому исследованию обработка, проведенная за четыре прохода при скорости вращения заготовки 357 об/мин и подаче инструмента 0,17 мм/об, позволяет получить минимальное отклонение от круглости (3,514 мкм), лучшую микротвердость (130,19 HV) и наименьшую шероховатость поверхности (0,64 мкм). Кроме того, исследование показывает, что увеличение количества проходов (более четырех) не приводит к значительному улучшению шероховатости поверхности или микротвердости. Однако это приводит к небольшому увеличению отклонения от круглости. Поэтому рекомендуется использовать максимум четыре прохода во время накатывания роликом образцов из алюминиевого сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения для достижения оптимальных результатов. Полученные результаты означают, что накатывание роликом может эффективно повысить общее качество поверхности и твердость заготовки. Кроме того, накатка роликами рассматривается как доступный метод повышения функциональности и прочности обработанных деталей за счет снижения вероятности появления поверхностных дефектов, таких как царапины и трещины. Обнаружено, что при увеличении скорости вращения заготовки шероховатость поверхности уменьшается. Тем не менее замечено, что она увеличивается как в условиях сухого трения, так и в условиях NFMQL, когда скорость вращения заготовки возрастает до 360...380 об/мин. Более того, обнаружено, что она уменьшается с увеличением подачи и количества проходов. Однако после трех или четырех проходов при скорости подачи 0,2...0,25 мм/об наблюдается заметное увеличение шероховатости поверхности. Отмечено, что с увеличением подачи микротвердость и отклонение от круглости растут. Кроме того, по мере увеличения количества проходов наблюдается снижение отклонения от круглости и повышение микротвердости. Количество проходов в условиях сухого трения и подача при накатывании в условиях NFMQL оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности. Скорость вращения заготовки, по-видимому, оказывает наибольшее влияние на микротвердость, за ней следуют подача и количество проходов. С другой стороны, кажется, что эффект увеличения микротвердости в условиях NFMQL-накатки проявляется сильнее. В условиях сухого трения скорость вращения заготовки оказывает существенное влияние на отклонение от круглости, а при накатывании в условиях NFMQL влияние оказывает подача.

Для цитирования: Соматкар А., Диведи Р., Чинчаникар С. Сравнительная оценка накатывания роликом сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 57–74. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-57-74.

Введение

Постоянный поиск новых методов обработки, позволяющих получить высокое качество поверхности и повысить ее механические свойства, в настоящее время вызывает большой

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, д.т.н., профессор

Технологический институт Вишвакармы,

Пуне – 411037, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchanikar@viit.ac.in

интерес. Одним из таких методов является накатывание роликом. Он позволяет повысить качество обработанной поверхности и обеспечить точность размеров деталей из различных материалов. В процессе обработки используется жесткий ролик, который сглаживает неровности и позволяет получить глянцевую поверхность. Накатывание роликом также может повысить твердость материала на микроуровне [1]. Во многих отраслях промышленности используется алюминиевый сплав 6061-T6 (Al6061-T6) ввиду его прочности, легкости, технологичности и коррозионной стойкости. Однако с использованием традиционных методов получить высокие качество поверхности и механические свойства деталей из Al6061-T6 достаточно сложно. Накатывание роликом показало себя многообещающим в решении этих проблем. Оно может сгладить неровности на поверхности и повысить точность размеров [2].

Обработка с минимальным количеством смазки (MQL) предполагает введение небольшого количества смазывающего вещества непосредственно в зону резания. Этот метод снижает трение, продлевает срок службы инструмента и обеспечивает более гладкую поверхность. Такой метод обработки реализуется без экологических и финансовых проблем, которые возникают при использовании большого количества смазки. Недавние исследования показали хорошие результаты при сочетании MQL с различными процессами обработки, включая точение и фрезерование [3–6]. Куркуте и Чаван (Kurkute and Chavan) [7] оптимизировали шероховатость поверхности и микротвердость при накатке роликом сплава Al63400. В их исследовании подача рассматривалась как значимый параметр, влияющий на шероховатость поверхности. Пател и Брамбхатт (Patel and Brahmhatt) [8] обнаружили, что скорость вращения шпинделя и глубина полировки являются наиболее важными параметрами для повышения микротвердости на 28 % по сравнению с предварительно обработанными поверхностями.

Группа исследователей выполнила накатку роликом, варьируя такие параметры процесса, как подача, глубина резания, скорость вращения заготовки и количество проходов. В большинстве исследований разрабатывали эксперименты с использованием метода цен-

трального композиционного плана поверхности отклика. В части исследований скорость вращения заготовки рассматривалась как доминирующий параметр, влияющий на шероховатость поверхности, а в некоторых исследованиях было обнаружено, что подача существенно влияет на шероховатость поверхности. В ряде исследований сообщалось, что глубина резания существенно влияет на шероховатость поверхности, а скорость вращения заготовки и количество проходов существенно влияют на микротвердость. В некоторых исследованиях сообщалось о влиянии взаимодействия силы накатывания и количества проходов на шероховатость поверхности. Скорость вращения заготовки, подача и количество проходов существенно влияют на шероховатость поверхности и микротвердость. Однако можно заметить, что основные технологические параметры, влияющие на характеристики процесса, зависят от технологических параметров, материала заготовки и условий охлаждения.

Прасад и Джон (Prasad and John) [9] исследовали процесс накатки роликом на композиционном материале Mg-SiC. В их исследовании проводились эксперименты с изменением скорости вращения заготовки, подачи, силы и количества проходов. Авторы наблюдали уменьшение шероховатости поверхности при скорости 171 об/мин, скорости подачи 0,18 мм/об, силе 21 Н и трех проходах. Группа исследователей наблюдала изменения в поверхностных и металлургических текстурах из-за развития сильных контактных напряжений и увеличения пластической деформации поверхностного слоя компонента во время накатки роликами [10]. Исследования показали повышение качества поверхности при более низкой скорости и большей глубине внедрения [11].

Окада и др. (Okada et al.) [12] проанализировали характеристики накатки роликами при минимальном количестве смазки. В их исследовании наблюдалось увеличение твердости заготовки на 126...323 HV. Группа ученых выполнила накатку роликами с использованием различных методов охлаждения, таких как низкотемпературная (криогенная) накатка и с использованием керосина в качестве охлаждающей жидкости. Ученые наблюдали повышение твердости и чистоты поверхности при накатке в условиях MQL

и при использовании керосина в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [13–15]. Группа исследователей оценивала целостность поверхности, варьируя такие параметры, как скорость, подача, количество проходов и условия охлаждения, а именно охлаждение поливом, MQL, низкотемпературное (криогенное) охлаждение и гибридное охлаждение. Результаты показали, что применение низкотемпературного (криогенного) охлаждения позволило повысить прочность материала, а использование гибридной охлаждающей жидкости позволило снизить шероховатость поверхности. Было отмечено, что микротвердость в незначительной степени зависит от типа условий охлаждения.

Из изученной литературы следует, что процесс накатки роликом эффективно повышает общее качество поверхности и твердость заготовки. Кроме того, накатка роликом рассматривается как доступный метод повышения функциональности и надежности обработанных деталей за счет снижения вероятности появления дефектов поверхности, таких как царапины и трещины. Исследования показали, что использование MQL при накатке роликом дает возможность сделать процесс еще лучше за счет улучшения смазки и снижения трения. За последнее десятилетие исследования показали более высокую производительность обработки при использовании наножидкостей в условиях MQL [16–19]. Однако попыток обработать сплав Al6061-T6 накаткой роликом с использованием наножидкости в условиях процесса формообразования с минимальным количеством смазки (NFMQL) было предпринято очень мало.

С этой точки зрения в настоящем исследовании проведена сравнительная оценка накатки роликом сплава Al6061-T6 без СОЖ и с использованием в качестве СОЖ наножидкости в условиях MQL. В работе произведена оценка, моделирование и оптимизация микротвердости, твердости, округлости и шероховатости поверхности с учетом таких факторов, как скорость вращения заготовки, подача и количество проходов. Математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от округлости были разработаны на основе экспериментальных результатов. Химический состав материала, условия процесса формообразования и детали инструмента для

накатки роликами представлены в следующем разделе. В третьем разделе обсуждается разработка экспериментальных математических моделей для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и округлости накатанной заготовки при обоих условиях охлаждения. В четвертом разделе проведена сравнительная оценка влияния параметров накатки роликом на характеристики, а именно шероховатость поверхности, микротвердость и округлость обработанной роликом заготовки при реализации обоих условий охлаждения. Далее представлены оптимизированные параметры процесса для достижения минимальной шероховатости поверхности и лучшей микротвердости и округлости поверхности при реализации обоих условий охлаждения. Наконец, представлены важные результаты настоящего исследования и возможности будущих исследований в этой области.

Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании использовали алюминиевый сплав 6061 (Al6061-T6), который находит широкое применение в приложениях общего назначения. Благодаря своему отношению предела прочности к весу, стойкости к коррозии и хорошей свариваемости этот сплав пользуется популярностью в производственных процессах и подходит для изготовления из него различных структурных компонентов. Это дисперсионно-твердеющий алюминиевый сплав, два наиболее важных компонента которого – кремний и магний. Свариваемость является основным преимуществом алюминиевого сплава 6061. Он используется в аэрокосмической промышленности благодаря прочности и легкости, а благодаря своему химическому составу может также использоваться в автомобиле- и судостроении. Выбранный образец имеет диаметр 30 мм и длину 50 мм. В табл. 1 показаны характеристики и химический состав алюминиевого сплава 6061.

В этом исследовании применялся однорольковый накатной инструмент с твердосплавным роликом. Твердосплавный роликовый накатной инструмент универсален и может использоваться на различных станках для разных целей. Возможность восстановления и продления срока службы инструмента делает его использование экономически эффективным решением для до-

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава Al6061-T6
Chemical composition of Al6061-T6 alloy

Элемент	Al	Cu	Cr	Mg	Mn	Si	Zn	Fe	Ti
Процентное содержание	95,8	0,15	0,2	1,1	0,15	0,75	0,25	0,19	0,15

стижения высокого качества поверхности. Для поддержания надлежащего давления в течение всего процесса накатки твердосплавный ролик подпружинен в обоих осевых направлениях. Путем переточки или притирки изношенного твердосплавного ролика его можно восстановить и продлить срок его службы. Инструмент с твердосплавным роликом может использоваться на токарных станках с ЧПУ, revolverных станках или традиционных токарных станках и подходит для всех внешних поверхностей валов, конических валов, радиусов, заплечиков и др. Накатка обработанной поверхности возможна до 0,1...0,2 мкм. На рис. 1 изображен накатник, который использовался в настоящем исследовании.



Рис. 1. Роликовый отделочный накатник, используемый в настоящем исследовании

Fig. 1. Roller burnishing tool used in the present study

Постоянная глубина накатки, равная 0,5 мм, поддерживалась при изменении подачи, скорости вращения заготовки и количества проходов в экспериментах без СОЖ и с использованием в качестве СОЖ наножидкости в условиях MQL. Наночастицы оксида алюминия (Al_2O_3) были объединены с базовой жидкостью на основе рас-

тительного подсолнечного масла для создания наножидкости. Шероховатость поверхности, микротвердость и отклонение от круглости (три основные характеристики, влияющие на показатели устойчивости) были изучены с использованием метода проектирования эксперимента (DOE). Все отклики были проанализированы, и эмпирические модели разработаны с использованием центрального композитного дизайна (CCD). Эксперименты были спланированы с использованием тестовой матрицы ротатбельного центрального композиционного планирования (CCRD) со значением альфа, равным 1,6817. Для изменения каждого числового параметра использовались пять уровней: центральная точка, плюс и минус 1 (факториальные точки) и плюс и минус альфа (осевые точки). В этой работе было проведено двадцать испытаний накаткой роликом в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ с различными параметрами процесса для построения моделей шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости. В табл. 2 перечислены кодированные уровни вместе с фактическими значениями параметров накатки, которые им соответствуют.

Для определения средних значений шероховатости поверхности использовали оборудование Taylor Hobson Talysurf, Surtronic Duo и автономное устройство измерения шероховатости поверхности. Для получения статистически значимого значения шероховатость поверхности измеряли в трех равномерно расположенных точках по периметру заготовки. Оценка качества поверхности была выполнена точно и последовательно в соответствии с этим подходом. Для проверки круглости использовали КИМ мостового типа (Zeiss Contura, диапазон измерения по осям 1200×800×800 мм). Геометрические отклонения были определены путем измерения круглости в двенадцати частях калиброванной области с помощью микрометрического инди-

Таблица 2

Table 2

Кодированные уровни и соответствующие им фактические параметры накатывания
Coded levels and corresponding actual cutting parameters

Параметры	Уровни для значения альфа, равного				
	-1,6817	-1	0	+1	+1,6817
Скорость вращения заготовки V , об/мин	100	200	300	400	500
Скорость подачи f , мм/об	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Количество проходов N	0,5	1	1,5	2	2,5

катора, имеющего диапазон измерения 12,5 мм, цену деления шкалы 0,001 мм и максимально допустимую погрешность (MPE) 4 мкм. Кроме того, микротвердость оценивали с помощью микротвердомера Виккерса. Угол при вершине алмазного индентора составлял 136°, испытание проводили при нагрузке в 100 г и 20-секундном периоде выдержки. Использование данных о шероховатости поверхности, отклонении от круглости и результатов микродюрметрических испытаний позволило провести тщательное исследование свойств заготовки.

Результаты и их обсуждение

В этом разделе рассматривается влияние параметров процесса накатки роликами на характеристики процесса в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ на основе созданных уравнений регрессии. Кривые, показывающие различные отклики, построены путем изменения одного из входных параметров при сохранении других параметров постоянными, чтобы понять физику процесса и эффекты взаимодействия параметров накатки на различные характеристики. Это также позволяет получить информацию о влиянии параметров накатки на различные технологические характеристики. Наконец, оптимизация технологических характеристик процесса при накатке роликом сплава Al6061-T6 рассматривается с использованием метода функции желательности.

Скорость вращения заготовки, подача и количество проходов (входные параметры) варьировались в ходе экспериментов. В табл. 3 представлена экспериментальная матрица и результаты наибольшего отклонения от круглости, микротвердости и шероховатости поверхности при

накатке роликом сплава Al6061-T6 в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ. Экспериментальные результаты накатки роликом сплава Al6061-T6 в условиях отсутствия СОЖ приведены в [20].

Методология поверхности отклика (RSM) была основной для анализа экспериментальных результатов. Нахождение области интереса, где отклик(и) достигает своего оптимального или близкого к нему значения, было еще одной целью использования RSM в дополнение к исследованию отклика(ов) во всем факторном пространстве. Чтобы понять физику процесса, был проведен анализ экспериментальных данных с целью создания уравнений регрессии для шероховатости поверхности (Ra), микротвердости (HV) и отклонения от круглости (Re). С помощью программы Stat-Ease Design Expert® (версия 7.0) был использован регрессивный метод для определения значений коэффициентов в уравнении.

Уравнения, разработанные для определения фактических значений коэффициента шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости в отсутствие СОЖ, приведены в [20], а уравнения для определения показателей при использовании наножидкости в условиях MQL приведены ниже:

$$Ra = 1,4209 - 0,00064V - 4,0943f - 0,2224N - 0,00275Vf - 0,00019VN + 0,025fN + 3,11 \cdot 10^{-6}V^2 + 13,4545f^2 + 20,042N^2; \quad (1)$$

$$HV = 85,3181 + 0,213V + 40,1136f - 6,3238N - 0,325Vf + 0,00625VN + 47,5fN - 0,0002V^2 - 90,91f^2 - 0,3522N^2; \quad (2)$$

Таблица 3

Table 3

Матрица эксперимента накатывания роликом

Roller burnishing experimental matrix

Скорость вращения заготовки V , об/мин	Скорость подачи f , мм/об	Количество проходов N	Шероховатость поверхности Ra , мкм		Микротвердость HV		Отклонение от круглости Re , мкм	
			Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL
300	0,2	3	0,81	0,62	117	128	7,7	4,8
200	0,15	2	0,82	0,68	114	120	9,6	5,6
200	0,15	4	0,89	0,69	116	118	8,6	4,8
200	0,25	2	0,92	0,77	116	122	5,4	8,8
200	0,25	4	0,9	0,78	125	131	8,7	7,7
400	0,15	2	0,94	0,78	118	129	10,1	3,4
400	0,15	4	0,84	0,71	111	131	1,6	3,2
400	0,25	2	0,97	0,81	110	126	8,4	9,2
400	0,25	4	0,79	0,75	113	136	2,9	7,4
300	0,2	3	0,81	0,61	117	128	8,4	5,5
300	0,2	3	0,81	0,61	117	128	8,6	5,7
100	0,2	3	0,92	0,72	112	108	13,2	9
500	0,2	3	0,93	0,75	104	131	4,2	6,1
300	0,1	3	0,94	0,70	123	121	1,5	2,8
300	0,3	3	0,96	0,79	124	132	2	9,2
300	0,2	1	0,95	0,83	123	119	8,7	7,7
300	0,2	5	0,86	0,73	125	133	4	3,6
300	0,2	3	0,83	0,65	117	125	6,9	5,2
300	0,2	3	0,82	0,61	113	128	8,3	5,4
300	0,2	3	0,81	0,62	118	131	8,7	5,9

$$\begin{aligned}
Re = & 13,142 - 0,058V - 3,78f - \\
& - 0,18N + 0,0975Vf - \\
& - 1,3 \cdot 10^{-4}VN - 4,75fN + 5,43 \cdot 10^{-5}V^2 + \\
& + 62,2f^2 + 0,0682N^2.
\end{aligned} \quad (3)$$

Используя метод дисперсионного анализа (ANOVA), была проверена достаточность полученных уравнений. Доля вариации точек данных измеряется коэффициентом множественных определений или R -квадратом. Коэффициент корреляции (R -квадрат), который находится между -1 и $+1$, всегда идеален. Если R действительно близок к $+1$, то уравнение важно.

Измерение того, какую часть дисперсии вокруг среднего значения объясняет модель, называется скорректированным R -квадратом. Мерой предсказательной точности модели для значения отклика является прогнозируемый R -квадрат. Считается «приемлемым соответствием», когда скорректированные и ожидаемые значения R -квадрата находятся в пределах около $0,20$ друг от друга. В противном случае может быть проблема с моделью или данными. Отношение сигнал/шум или диапазон в ожидаемом отклике относительно соответствующей ошибки – это то, что называется достаточной точностью. Четыре или более – идеальное значение.

С результатами ANOVA для определения шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ можно ознакомиться в [20], а результаты ANOVA в условиях NFMQL приведены в табл. 4. Результаты ANOVA для исследованных откликов в условиях отсутствия СОЖ также приведены в табл. 4 для сравнительной оценки. Результаты ANOVA для определения шероховатости поверхности в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL показывают, что модельные F -значения равны 46,91 и 19,51 соответственно. Следовательно, модели являются значимыми. Значения «Prob > F » менее 0,05 указывают на то, что условия модели являются значимыми. Значимыми параметрами модели, наблюдаемыми для шероховатости поверхности в условиях отсутствия СОЖ, являются f , N , $V \times f$, $V \times N$, $f \times N$, V^2 , f^2 , N^2 , а для накатки в условиях NFMQL значимыми параметрами модели являются V , f , N , $V \times f$, V^2 , f^2 , N^2 .

Результаты ANOVA для микротвердости показывают, что модельные F -значения, равные 11,99 и 16,71, при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL означают, что модели значимы. Существует всего 0,03%-я вероятность того, что такое большое «модельное F -значение» может возникнуть из-за шума. В этом случае V , $V \times f$, $V \times N$, $f \times N$, V^2 , f^2 , N^2 при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и V , f , N , $V \times f$, $f \times N$, V^2 в условиях NFMQL явля-

ются значимыми параметрами модели. Результаты ANOVA для округлости показывают, что модельные F -значения, равные 17,62 и 27,35, при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL означают, что модели значимы. В этом случае V , N , $V \times N$, $f \times N$, f^2 при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и V , f , N , $V \times f$, V^2 в условиях NFMQL являются значимыми параметрами модели.

Каждая модель, созданная для накатки роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL, имеет значение R -квадрат выше 0,9, что указывает на долю вариации в точках данных. Таким образом, во время накатки роликом сплава Al6061-T6 микротвердость, шероховатость поверхности и отклонение от круглости можно точно предсказать с помощью установленных эмпирических уравнений.

Для улучшения понимания созданы двумерные графики влияния подачи, скорости и количества проходов на шероховатость поверхности, твердости и отклонения от круглости с использованием полученных уравнений 1–3. Для облегчения сравнения и лучшего понимания также построены кривые для исследуемых реакций в условиях отсутствия СОЖ с использованием моделей, полученных в [20]. Построение кривых для шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости включает изменение одного входного параметра при сохранении постоянного значения для двух других.

Таблица 4

Table 4

Дисперсионный анализ (ANOVA) для исследованных откликов в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ [20]

ANOVA for investigated responses under dry [20] and NFMQL cutting conditions

Факторы	Шероховатость поверхности R_a , мкм		Микротвердость HV		Отклонение от круглости R_e , мкм	
	Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL
R -квадрат	0,9769	0,9461	0,9152	0,9377	0,9407	0,9609
Скорректированный R -квадрат	0,956	0,89765	0,8389	0,8816	0,8873	0,9258
Прогнозируемый R -квадрат	0,8472	0,848529	0,855	0,8389	0,8933	0,7421
Адекватная точность	19,328	12,74978	15,464	16,5655	16,002	18,2847
F -значение модели	46,91	19,51	11,99	16,71	17,62	27,35

На рис. 2, *а* показана зависимость шероховатости поверхности от скорости вращения заготовки при скорости подачи 0,2 мм/об и количестве проходов, равном трем. На рис. 2, *б* показана зависимость шероховатости поверхности от скорости подачи при скорости вращения заготовки 300 об/мин и количестве проходов, равном трем. На рис. 2, *в* показана зависимость шероховатости поверхности от количества проходов при скорости вращения заготовки 300 об/мин и скорости подачи, равной 0,2 мм/об. Сравнивая накатку роликом в условиях NFMQL и в условиях отсутствия СОЖ, можно отметить в первом случае меньшую шероховатость поверхности. Можно также заметить, что по мере возрастания скорости вращения заготовки до 360–380 об/мин шероховатость поверхности уменьшается перед увеличением. Кроме того, она уменьшается с увеличением скорости подачи и количества проходов. Однако при скорости подачи выше 0,2...0,25 мм/об и количества проходов более 3–4 шероховатость поверхности увеличивается.

На рис. 2, *б* видно оптимумы для откликов при изменении скорости подачи. Минимальные шероховатость поверхности и отклонение от круглости можно получить, используя скорость подачи в диапазоне 0,18...0,22 мм/об, скорость вращения заготовки в диапазоне 250...350 об/мин и три прохода. На рис. 3, *а* и рис. 4, *а* отражены изменения микротвердости и отклонения от круглости соответственно в зависимости от скорости вращения заготовки, полученные при постоянной скорости подачи 0,2 мм/об и трех проходах. Можно увидеть, что микротвердость увеличивается с повышением скорости вращения заготовки. Однако этот эффект был более выражен для накатки роликом в условиях NFMQL. Более высокие значения микротвердости можно увидеть при накатке роликом в условиях NFMQL. Так, микротвердость уменьшается при достижении скорости вращения заготовки 280...300 об/мин. С другой стороны, видно, что отклонение от круглости уменьшается с увеличением скорости вращения заготовки (рис. 4, *а*). Однако можно за-

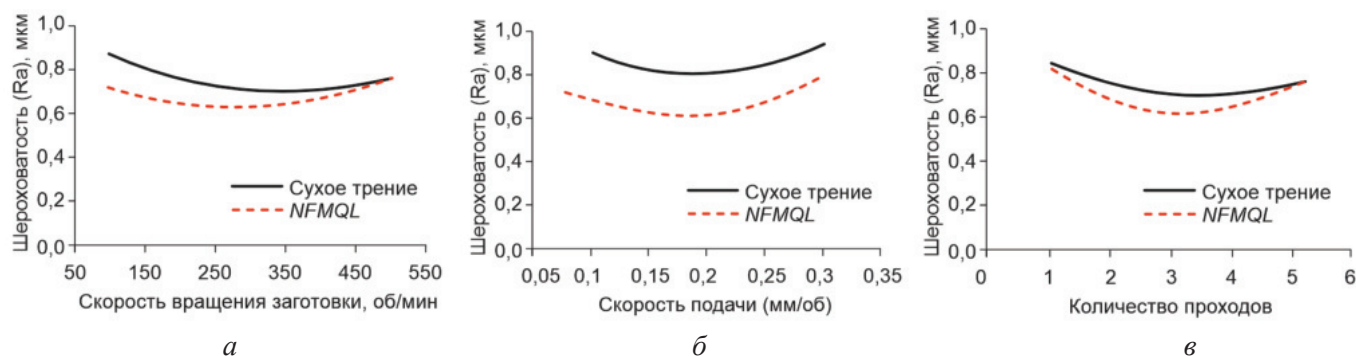


Рис. 2. Шероховатость поверхности, изменяющаяся в зависимости от скорости вращения заготовки (*а*), скорости подачи (*б*) и количества проходов (*в*)

Fig. 2. Surface roughness varying with cutting speed (*а*), feed (*б*), and number of passes (*в*)

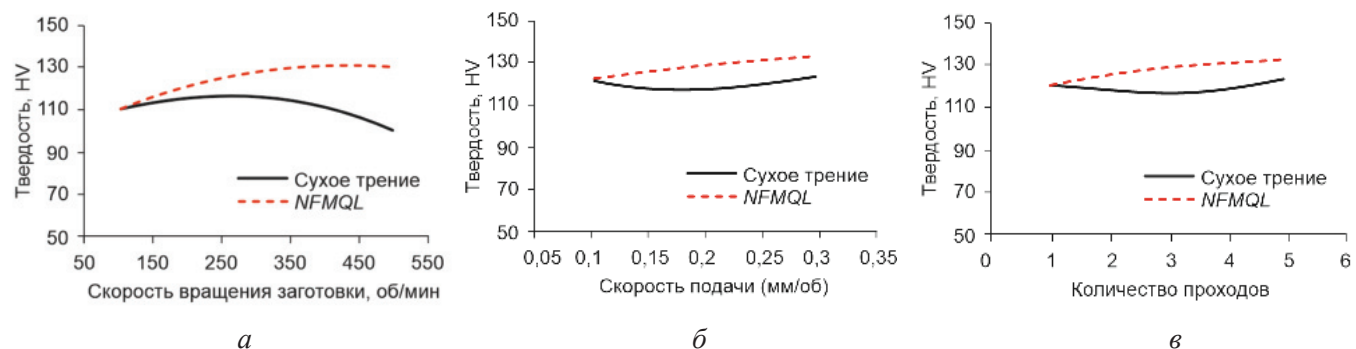


Рис. 3. Твердость, изменяющаяся в зависимости от скорости вращения заготовки (*а*), скорости подачи (*б*) и количества проходов (*в*)

Fig. 3. Microhardness varying with cutting speed (*а*), feed (*б*), and number of passes (*в*)

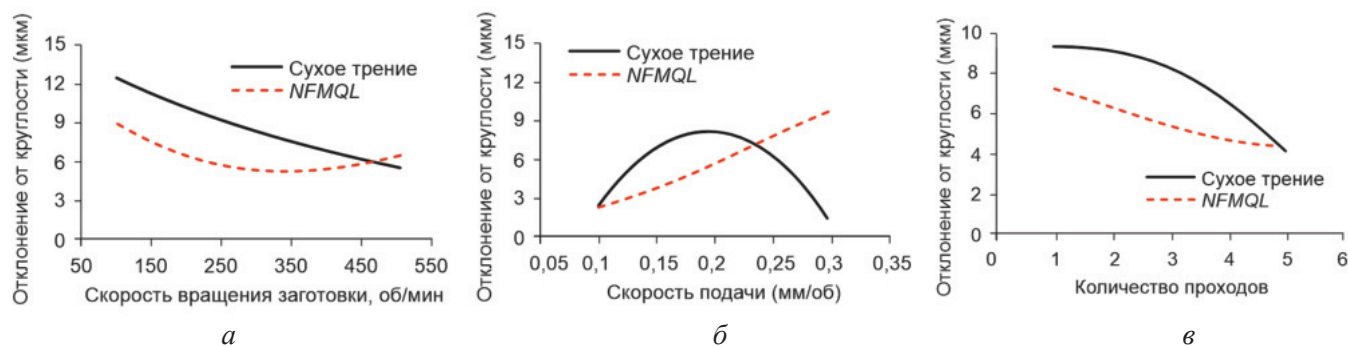


Рис. 4. Отклонение от круглости, изменяющееся в зависимости от скорости вращения заготовки (*a*), скорости подачи (*б*) и количества проходов (*в*)

Fig. 4. Roundness error varying with cutting speed (*a*), feed (*б*), and number of passes (*в*)

метить, что она увеличивается при достижении скорости вращения заготовки 300...350 м/мин. Более низкие значения отклонения от круглости отмечены при накатке роликом в условиях NFMQL.

На рис. 3, *б* и рис. 4, *б* отражены изменения микротвердости и отклонения от круглости соответственно в зависимости от скорости подачи, полученные при постоянной скорости вращения заготовки 300 об/мин и трех проходах. На рис. 3, *в* и рис. 4, *в* показаны изменения микротвердости и отклонения от круглости соответственно в зависимости от количества проходов, полученные при постоянной скорости вращения заготовки 300 об/мин и скорости подачи 0,2 мм/об.

Видно, что максимальная микротвердость, меньшие шероховатость поверхности и отклонение от круглости могут быть получены при накатке роликом в условиях NFMQL по сравнению с накаткой роликом в условиях отсутствия СОЖ. Микротвердость и отклонение от круглости могут увеличиваться с повышением скорости подачи. Увеличение микротвердости и уменьшение отклонения от круглости происходит с увеличением количества проходов. Видно, что повышение скорости подачи приводит к противоречивым откликам для шероховатости поверхности и микротвердости. Компромисс между отклонением от круглости, микротвердостью и меньшей шероховатостью поверхности может быть получен с использованием значения скорости подачи в диапазоне 0,18...0,22 мм/об. Шероховатость поверхности может уменьшаться с увеличением количества проходов. Однако существенного преимущества в снижении шероховатости поверхности при реализации более

чем четырех проходов не наблюдается. Отклонение от круглости может быть минимизировано с использованием большего количества проходов. Аналогично максимальная микротвердость может быть получена с использованием большего количества проходов.

В табл. 5–7 показаны результаты ANOVA для *F*-значений шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL соответственно. Как уже было отмечено в [20], с помощью ANOVA исследованы отклики для накатки роликом в условиях отсутствия СОЖ. *F*-значение выделено, чтобы отметить факторы, которые оказали существенное влияние на отклики. Табл. 5–7 также содержат процентные вклады различных элементов, которые рассчитаны путем деления *F*-значения каждого элемента на *F*-значение всего элемента.

Согласно табл. 5, в условиях отсутствия СОЖ на шероховатость поверхности в первую очередь влияют более высокий порядок скорости подачи (вклад около 30,76 %), более высокий порядок скорости вращения заготовки и эффект взаимодействия скорости вращения заготовки и количества проходов (вклад около 20 % и 15,88 % соответственно). Скорость вращения заготовки и скорость подачи, с другой стороны, оказывают минимальное влияние. Тем не менее можно считать, что количество проходов имеет решающее значение для снижения шероховатости поверхности. И наоборот, при накатке роликом в условиях NFMQL на шероховатость поверхности больше всего влияет более высокий порядок количества проходов (вклад около 36,98 %), за которым следует более высокий порядок скорости

Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения шероховатости поверхности (R_a): F -значения и процентный вклад различных параметров

ANOVA for surface roughness (R_a): F -values and % contribution of different parameters

Элементы	Сухое трение		NFMQL	
	F -значение	Процентный вклад	F -значение	Процентный вклад
Скорость резания V , об/мин	0,3382	0,07	4,2267	1,85
Подача f , мм/об	6,3512	1,23	<u>21,6487</u>	9,46
Количество проходов N	<u>63,1738</u>	12,25	11,2517	4,92
Взаимодействие V и f	<u>12,7024</u>	2,46	2,8334	1,24
Взаимодействие V и N	<u>81,8517</u>	15,88	5,2688	2,30
Взаимодействие f и N	<u>21,7218</u>	4,21	0,0234	0,01
V^2	<u>103,2749</u>	20,03	<u>45,6632</u>	19,96
f^2	<u>158,5728</u>	30,76	<u>53,2904</u>	23,29
N^2	<u>67,5406</u>	13,10	<u>84,6219</u>	36,98
Итоговое F -значение	515,5274	100,00	228,8283	100,00

Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

подачи и скорость вращения заготовки (вклад около 23,29 и 19,96 % соответственно).

Табл. 6 показывает результаты ANOVA для F -значений микротвердости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL. Очевидно, что в условиях сухой обработки более высокий порядок скорости резания V^2 (примерно 31,02 % вклада), скорость резания V (примерно 16,91 % вклада) и более высокий порядок подачи f^2 и проходов N^2 (примерно 12,68 и 14,87 % вклада соответственно) оказывают наибольшее влияние на микротвердость, при этом подача f и количество проходов N оказывают наименьшее влияние (порядка 0,68 и 1,67 % вклада соответственно). Напротив, в условиях применения NFMQL результаты экспериментов показывают, что количество проходов N (17,8 % вклада), подача f (12,25 % вклада), скорость резания первого порядка V (47,77 %) и второго порядка V^2 (12,67 %) оказывают наибольшее влияние на микротвердость.

В табл. 7 приведены результаты ANOVA для F -значений отклонения от круглости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в

условиях NFMQL. В условиях отсутствия СОЖ отклонение от круглости в значительной степени зависит от более высокого порядка скорости подачи (вклад около 32,5 %), скорости вращения заготовки (вклад около 25,89 %), количества проходов (вклад около 15,47 %), а также эффекта взаимодействия скорости вращения заготовки и количества проходов (вклад около 18,46 %). С другой стороны, отклонение от круглости при накатке роликом в условиях NFMQL, как можно заметить, сильно зависит от скорости подачи (вклад около 67,36 %), количества проходов (вклад около 11,81 %) и более высокого порядка скорости вращения заготовки (вклад около 9,57 %).

Очевидно, что скорость подачи в условиях NFMQL и количество проходов в условиях отсутствия СОЖ оказывают значительное влияние на шероховатость поверхности. Скорость вращения заготовки, по-видимому, оказывает наибольшее влияние на микротвердость, а скорость подачи и количество проходов идут на втором и третьем месте. С другой стороны, этот эффект кажется более выраженным при накатке роликом в условиях NFMQL. В условиях отсутствия

Таблица 6

Table 6

**Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения микротвердости: F -значения
и процентный вклад различных параметров**

ANOVA for microhardness: F -values and % contribution of different parameters

Элементы	Сухое трение		NFMQL	
	F -значение	Процентный вклад	F -значение	Процентный вклад
Скорость резания V , об/мин	<u>15,8251</u>	16,91	<u>72,1848</u>	47,77
Подача f , мм/об	0,6335	0,68	<u>18,5180</u>	12,25
Количество проходов N	1,5631	1,67	<u>26,8943</u>	17,80
Взаимодействие V и f	7,4668	7,98	4,1151	2,72
Взаимодействие V и N	5,8132	6,21	0,6087	0,40
Взаимодействие f и N	7,4668	7,98	8,7903	5,82
V^2	<u>29,0338</u>	31,02	<u>19,1484</u>	12,67
f^2	<u>11,8708</u>	12,68	0,2530	0,17
N^2	<u>13,9156</u>	14,87	0,6078	0,40
Итоговое F -значение	93,5887	100	151,1204	100,00

Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

Таблица 7

Table 7

**Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения отклонения от круглости:
 F -значения и процентный вклад различных параметров**

ANOVA for roundness error: F -values and % contribution of different parameters

Элементы	Сухое трение		NFMQL	
	F -значение	Процентный вклад	F -значение	Процентный вклад
Скорость резания V , об/мин	<u>40,2758</u>	25,89	18,0635	7,28
Подача f , мм/об	0,6619	0,43	<u>167,1666</u>	67,36
Количество проходов N	<u>24,0589</u>	15,47	<u>29,3038</u>	11,81
Взаимодействие V и f	1,4796	0,95	6,0885	2,45
Взаимодействие V и N	<u>28,7154</u>	18,46	0,0040	0,00
Взаимодействие f и N	5,7595	3,70	1,4451	0,58
V^2	0,9816	0,63	<u>23,7563</u>	9,57
f^2	<u>50,5574</u>	32,50	1,9515	0,79
N^2	3,0571	1,97	0,3743	0,15
Итоговое F -значение	155,5472	100	248,1536	100,00

Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

СОЖ скорость вращения заготовки оказывает существенное влияние на отклонение от круглости; в условиях NFMQL скорость подачи оказывает значительное влияние. Из рис. 2–4 и табл. 5–7 очевидно, что параметры процесса противоречат полезным откликам. Кроме того, для получения желаемых результатов необходима многоцелевая оптимизация этих конкурирующих параметров.

В настоящей работе для оптимизации параметров процесса накатки роликом в условиях

NFMQL с целью достижения минимального отклонения от круглости, максимальной микротвердости и минимальной шероховатости поверхности используется метод функции желательности. При использовании этого метода оптимизация нескольких переменных отклика становится оптимизацией одной функции желательности, а каждая переменная отклика преобразуется в функцию желательности [20–23]. В табл. 8 перечислены диапазоны функции отклика и переменные процесса.

Таблица 8

Table 8

Ограничения для оптимизации параметров процесса при обработке в условиях NFMQL

Constraints for optimization of process parameters for NFMQL cutting conditions

Параметры	Заданный уровень	Минимальный предел	Максимальный предел
Скорость резания V , об/мин	В диапазоне	100	500
Подача f , мм/об	В диапазоне	0,1	0,2
Количество проходов N	В диапазоне	1	5
Шероховатость поверхности Ra , мкм	Минимизировать	0,61	0,83
Микротвердость HV	Минимизировать	108	136
Отклонение от круглости Re , мкм	Минимизировать	2,8	9,2

В табл. 8 представлены минимальные и максимальные значения предела шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости на основе экспериментальных результатов. Для преобразования каждого отклика в соответствующую ему функцию желательности используется одностороннее преобразование [20–23]. В этом исследовании была проведена многоцелевая оптимизация накатки роликом с использованием модуля оптимизации программного обеспечения Design-Expert®. Желательность шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости оценивалась для каждого уровня независимых факторов. Желательность минимальной шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимального отклонения от круглости затем преобразовывались в одну функцию желательности. Оптимальные параметры процесса для наименьшей шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимального

отклонения от круглости в условиях NFMQL представлены в табл. 9.

Настоящее исследование показывает, что идеальными параметрами для накатки роликами сплава Al6061-T6 являются скорость вращения заготовки 357 об/мин, скорость подачи 0,17 мм/об и четыре прохода. Эти результаты дают минимальную шероховатость поверхности 0,64 мкм, максимальную микротвердость 130,19 HV и минимальное отклонение от круглости 3,514 мкм. Однако было обнаружено, что идеальными параметрами для накатки роликами сплава Al6061-T6 в условиях отсутствия СОЖ являются скорость вращения заготовки 344 об/мин, скорость подачи 0,25 мм/об и четыре прохода. Это дает минимальную шероховатость поверхности 0,807 мкм, максимальную микротвердость 119,2 HV и минимальное отклонение от круглости 4,282 мкм.

Как можно видеть, накатка роликами в условиях NFMQL дает сниженные значения шероховатости поверхности, отклонения от круглости

Семейство оптимизированных параметров обработки в условиях NFMQL
A family of optimized process parameters for NFMQL cutting conditions

№	Скорость резания V , об/мин	Подача f , мм/об	Количество проходов N	Шероховатость поверхности Ra	Микротвердость HV	Отклонение от круглости Re	Необходимое значение
1	357,6	0,17	3,68	0,6435	130,1976	3,519	0,8417
2	357,64	0,16	3,68	0,6436	130,1916	3,515	0,8417
3	357,81	0,16	3,68	0,6436	130,1988	3,514	0,8417
4	357,68	0,17	3,68	0,6436	130,2047	3,518	0,8417
5	357,85	0,16	3,68	0,6436	130,1997	3,515	0,8417
6	357,67	0,16	3,68	0,6436	130,1962	3,515	0,8417

и максимальной микротвердости по сравнению с накаткой роликом в условиях отсутствия СОЖ. Самая низкая шероховатость поверхности, которую удалось обнаружить, составила 0,64 мкм. Однако проделанная работа подчеркивает необходимость дополнительных исследований накатки роликом сплавов Al6061-T6 с целью получения улучшенной геометрии готовой детали, которая приближается к шероховатости поверхности до 0,3–0,4 мкм с повышенной микротвердостью.

Выводы

В настоящей работе была предпринята попытка исследовать накатку роликом сплава Al6061-T6. В исследовании дана сравнительная оценка накатки роликом сплава Al6061-T6 в условиях отсутствия СОЖ и с использованием наножидкости в условиях минимального количества смазки (NFMQL). В исследовании оценены, смоделированы и оптимизированы микротвердость, округлость и шероховатость поверхности с учетом таких факторов, как скорость вращения детали, скорость подачи и количество проходов. Математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости были разработаны на основе экспериментальных результатов. Можно сделать следующие выводы.

- Для моделей шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости по-

лучено значение R -квадрата выше 0,9; значит, разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования исследуемых откликов и в условиях отсутствия СОЖ, и в условиях NFMQL.

- Накатка роликом в условиях NFMQL обеспечивает пониженные значения шероховатости поверхности (0,64 мкм), отклонения от круглости (3,514 мкм) и максимальной микротвердости (130,19 HV) по сравнению с накаткой в условиях отсутствия СОЖ. Однако накатка роликом в условиях отсутствия СОЖ дает сравнительно более высокую шероховатость поверхности (0,807 мкм), отклонения от круглости (4,282 мкм) и более низкую микротвердость (119,2 HV).

- Шероховатость поверхности уменьшается с повышением скорости вращения заготовки. Однако она увеличивается с ростом скорости вращения заготовки до 360...380 об/мин как в условиях отсутствия СОЖ, так и в условиях NFMQL. Кроме того, наблюдается уменьшение шероховатости при повышении скорости подачи и количества проходов. Однако после трех-четырех проходов со скоростью подачи 0,2...0,25 мм/об замечено увеличение шероховатости поверхности.

- Микротвердость и отклонение от круглости увеличиваются с повышением скорости подачи. Увеличение микротвердости и уменьшение отклонения от круглости наблюдаются с увеличением количества проходов.

- Повышение скорости подачи рассматривается как приводящее к противоречивым откликам для шероховатости поверхности и микротвердости. Компромисс между отклонением от круглости, микротвердостью и более низкой шероховатостью поверхности получен с использованием значения скорости подачи в диапазоне 0,18...0,22 мм/об. Отмечено, что отклонение от круглости уменьшается с увеличением количества проходов, а максимальная микротвердость наблюдается с увеличением количества проходов.

- Шероховатость поверхности существенно зависит от скорости подачи при накатке роликом в условиях NFMQL и количества проходов в условиях отсутствия СОЖ. Микротвердость, по-видимому, в большей степени зависит от скорости вращения заготовки, а скорость подачи и количество проходов идут на втором и третьем месте. Однако похоже, что этот эффект более заметен при накатке роликом в условиях NFMQL. Отклонение от круглости существенно зависит от скорости вращения заготовки в условиях отсутствия СОЖ и скорости подачи при накатке роликом в условиях NFMQL.

- Скорость вращения заготовки, равная 357 об/мин, скорость подачи 0,17 мм/об и четыре прохода рекомендованы в качестве оптимальных параметров для накатки роликом сплава Al6061-T6 для получения минимальной шероховатости поверхности 0,64 мкм, максимальной микротвердости 130,19 HV и минимального отклонения от круглости 3,514 мкм.

Список литературы

1. Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines / A. Rodríguez, L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Fernández, A. Lamikiz // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2011. – Vol. 4. – P. 220–237. – DOI: 10.1504/IJMMS.2011.041470.

2. Saffar S., Eslami H. Increasing the fatigue life and surface improvement of AL7075 alloy T6 by using ultrasonic ball burnishing process // *International Journal of Surface Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 16 (3). – P. 181–206. – DOI: 10.1504/IJSURFSE.2022.125438.

3. Somatkar A.A., Dwivedi R., Chinchani S. Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing: a comprehensive review of parameters optimization, and applications // *Communications on*

Applied Nonlinear Analysis. – 2024. – Vol. 31 (1s). – P. 51–69. – DOI: 10.52783/cana.v31.563.

4. Artificial neural network-based optimization of operating parameters for minimum quantity lubrication-assisted burnishing process in terms of surface characteristics / T.-T. Nguyen, T.-A. Nguyen, Q.-H. Trinh, X.-B. Le, L.-H. Pham, X.-H. Le // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 34 (9). – P. 7005–7031. – DOI: 10.1007/s00521-021-06834-6.

5. Nguyen T.-T. Multi-response performance optimization of burnishing operation for improving hole quality // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 43 (12). – P. 560. – DOI: 10.1007/s40430-021-03274-0.

6. Shirsat U., Ahuja B., Dhuttargaon M. Effect of burnishing parameters on surface finish // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2017. – Vol. 98. – P. 431–436. – DOI: 10.1007/s40032-016-0320-3.

7. Kurkute V., Chavan S.T. Modeling and optimization of surface roughness and microhardness for roller burnishing process using response surface methodology for Aluminum 63400 alloy // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 542–547. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.081.

8. Patel K.A., Brahmabhatt P.K. Response surface methodology-based desirability approach for optimization of roller burnishing process parameter // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2018. – Vol. 99. – P. 729–736. – DOI: 10.1007/s40032-017-0368-8.

9. Prasad K.A., John M.R.S. Optimization of external roller burnishing process on magnesium silicon carbide metal matrix composite using response surface methodology // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 43 (7). – P. 342. – DOI: 10.1007/s40430-021-03069-3.

10. Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish / B. Tadic, P.M. Todorovic, O. Luzanin, D. Miljanic, B.M. Jeremic, B. Bogdanovic, D. Vukelic // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 67. – P. 601–611. – DOI: 10.1007/s00170-012-4508-2.

11. El-Khabeery M.M., El-Axir M.H. Experimental techniques for studying the effects of milling roller burnishing parameters on surface integrity // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41 (12). – P. 1705–1719. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00036-0.

12. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects /

M. Okada, S. Suenobu, K. Watanabe, Y. Yamashita, N. Asakawa // *Mechatronics*. – 2015. – Vol. 29. – P. 110–118. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.11.002.

13. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model / B. Huang, Y. Kaynak, Y. Sun, I.S. Jawahir // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 31. – P. 1–6. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.097.

14. Caudill J., Schoop J., Jawahir I.S. Correlation of surface integrity with processing parameters and advanced interface cooling/lubrication in burnishing of Ti-6Al-4V alloy // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2019. – Vol. 5 (1). – P. 53–66. – DOI: 10.1080/2374068X.2018.1511215.

15. Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 106 (1). – P. 431–440. – DOI: 10.1007/s00170-019-04631-z.

16. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL) // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2023. – Vol. 104 (1). – P. 183–199. – DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.

17. Kulkarni P., Chinchani S. Modeling turning performance of Inconel 718 with hybrid nanofluid under MQL using ANN and ANFIS // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2024. – Vol. 18 (70). – P. 71–90. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

18. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2024. – Vol. 18 (68). – P. 222–241. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.

19. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2024. – P. 1–29. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

20. Дзиведи Р., Соматкар А., Чинчаникар С. Моделирование и оптимизация процесса накатывания роликом Al6061-T6 для достижения минимального отклонения от круглости, минимальной шероховатости поверхности и повышения ее микротвердости // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 52–65. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-52-65.

21. Чинчаникар С., Гейдж М.Г. Моделирование рабочих характеристик и мультикритериальная оптимизация при токарной обработке нержавеющей стали AISI 304 (12X18H10T) резцами с износостойким покрытием и с износостойким покрытием, подвергнутым микропескоструйной обработке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 117–135. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-117-135.

22. Chinchani S., Choudhury S.K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: an optimization approach // *Measurement*. – 2013. – Vol. 46 (4). – P. 1572–1584. – DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.032.

23. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2022. – Vol. 8 (4). – P. 3730–3748. – DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



Comparative evaluation of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry and nanofluid minimum quantity lubrication conditions

Avinash Somatkar^{1, 2, a}, Rashmi Dwivedi^{2, b}, Satish Chinchani^{3, c, *}

¹ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Information Technology, Pune, 411048, India

² Mechanical Engineering Department, Sri Satya Sai University of Technology & Medical Science, Sehore, Madhya Pradesh, 466001, India

³ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, Pune, 411037, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-2885-2104>, avinash.somatkar@viit.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-9755-5330>, rashmidwivedi29@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchani@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 September 2024

Revised: 10 October 2024

Accepted: 14 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Roller burnishing

Al6061-T6

Nanofluid

MQL

Optimization

ABSTRACT

Introduction. Roller burnishing is one of the most popular methods for improving the surface quality of a workpiece, increasing its wear resistance, microhardness and corrosion resistance. During the processing, the workpiece is compressed and smoothed under the pressure of hardened roller. **Purpose of the work.** The results of the research show that the introduction of minimum quantity lubrication (MQL) during roller burnishing makes it possible to increase the efficiency of the process by reducing friction and improving lubrication. Studies have shown that the use of nanofluids under MQL conditions improves the machining performance. However, very little attention has been paid to the roller burnishing of Al6061-T6 alloy under nano minimum quantity lubrication (NFMQL) conditions. **The methods of investigation.** In light of this, this study compares the performance of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry friction conditions and NFMQL conditions. The microhardness, roundness, and surface roughness are evaluated, modeled, and optimized in the study by considering the cutting speed, feed rate, and number of passes. Based on the experimental results, mathematical models are established to predict the surface roughness, microhardness, and roundness deviation. **Results and Discussion.** The developed models of surface roughness, microhardness and roundness deviation show the R-square value higher than 0.9, which allows these models to be confidently used to predict the studied responses under dry friction conditions and under NFMQL conditions within the parameter domain selected in this work. According to this study, the machining performed in four passes at a cutting speed of 357 rpm and a tool feed of 0.17 mm/rev can obtain the lowest roundness deviation (3.514 μm), the best microhardness (130.19 HV) and the lowest surface roughness (0.64 μm). Further, the study shows that increasing the number of passes (more than four) does not lead to a significant improvement in surface roughness or microhardness. However, it leads to a slight increase in roundness deviation. Therefore, it is recommended to use a maximum of four passes during roller burnishing of Al6061-T6 aluminum alloy specimens under dry friction conditions to achieve optimal results. The obtained results imply that roller burnishing can effectively improve the overall surface quality and hardness of the workpiece. In addition, roller burnishing is regarded as an affordable method to enhance the functionality and strength of the machined parts by reducing the occurrence of surface defects such as scratches and cracks. It is found that the surface roughness decreases with the increase of the cutting speed. However, it is observed to increase under both dry friction and NFMQL conditions when the cutting speed is increased to 360–380 rpm. Moreover, it is found to decrease with the increase of the feed and the number of passes. But after three or four passes at a feed rate of 0.2–0.25 mm/rev, a noticeable increase in the surface roughness is observed. It is noticed that with the increase of the feed, the microhardness and the roundness deviation increase. In addition, as the number of passes increases, the roundness deviation decreases and the microhardness increases. The number of passes under dry friction condition and feed rate under NFMQL rolling has significant effects on the surface roughness. The cutting speed seems to have the greatest effect on the microhardness, followed by feed rate and the number of passes. On the other hand, the effect of increasing microhardness under NFMQL conditions seems to be stronger. Under dry friction condition, the cutting speed has a significant effect on the roundness deviation, and under NFMQL conditions, the feed rate has an effect.

For citation: Somatkar A., Dwivedi R., Chinchani S. Comparative evaluation of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry and nanofluid minimum quantity lubrication conditions. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 57–74. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-57-74. (In Russian).

* Corresponding author

Satish Chinchani, D.Sc. (Engineering), Professor

Vishwakarma Institute of Technology,

411037, Pune, India

Tel.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchani@viit.ac.in

References

1. Rodríguez A., López de Lacalle L.N., Celaya A., Fernández A., Lamikiz A. Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2011, vol. 4, pp. 220–237. DOI: 10.1504/IJMMS.2011.041470.
2. Saffar S., Eslami H. Increasing the fatigue life and surface improvement of AL7075 alloy T6 by using ultrasonic ball burnishing process. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2022, vol. 16 (3), pp. 181–206. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2022.125438.
3. Somatkar A.A., Dwivedi R., Chinchani S. Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing: a comprehensive review of parameters optimization, and applications. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31 (1s), pp. 51–69. DOI: 10.52783/cana.v31.563.
4. Nguyen T.-T., Nguyen T.-A., Trinh Q.-H., Le X.-B., Pham L.-H., Le X.-H. Artificial neural network-based optimization of operating parameters for minimum quantity lubrication-assisted burnishing process in terms of surface characteristics. *Neural Computing and Applications*, 2022, vol. 34 (9), pp. 7005–7031. DOI: 10.1007/s00521-021-06834-6.
5. Nguyen T.-T. Multi-response performance optimization of burnishing operation for improving hole quality. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, vol. 43 (12), p. 560. DOI: 10.1007/s40430-021-03274-0.
6. Shirsat U., Ahuja B., Dhuttargaon M. Effect of burnishing parameters on surface finish. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2017, vol. 98, pp. 431–436. DOI: 10.1007/s40032-016-0320-3.
7. Kurkute V., Chavan S.T. Modeling and optimization of surface roughness and microhardness for roller burnishing process using response surface methodology for Aluminum 63400 alloy. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 542–547. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.081.
8. Patel K.A., Brahmabhatt P.K. Response surface methodology-based desirability approach for optimization of roller burnishing process parameter. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2018, vol. 99, pp. 729–736. DOI: 10.1007/s40032-017-0368-8.
9. Prasad K.A., John M.R.S. Optimization of external roller burnishing process on magnesium silicon carbide metal matrix composite using response surface methodology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, vol. 43 (7), p. 342. DOI: 10.1007/s40430-021-03069-3.
10. Tadic B., Todorovic P.M., Luzanin O., Miljanic D., Jeremic B.M., Bogdanovic B., Vukelic D. Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, pp. 601–611. DOI: 10.1007/s00170-012-4508-2.
11. El-Khabeery M.M., El-Axir M.H. Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41 (12), pp. 1705–1719. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00036-0.
12. Okada M., Suenobu S., Watanabe K., Yamashita Y., Asakawa N. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects. *Mechatronics*, 2015, vol. 29, pp. 110–118. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.11.002.
13. Huang B., Kaynak Y., Sun Y., Jawahir I.S. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.097.
14. Caudill J., Schoop J., Jawahir I.S. Correlation of surface integrity with processing parameters and advanced interface cooling/lubrication in burnishing of Ti-6Al-4V alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2019, vol. 5 (1), pp. 53–66. DOI: 10.1080/2374068X.2018.1511215.
15. Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106 (1), pp. 431–440. DOI: 10.1007/s00170-019-04631-z.
16. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL). *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2023, vol. 104 (1), pp. 183–199. DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.
17. Kulkarni P., Chinchani S. Modeling turning performance of Inconel 718 with hybrid nanofluid under MQL using ANN and ANFIS. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2024, vol. 18 (70), pp. 71–90. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

18. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2024, vol. 18 (68), pp. 222–241. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.
19. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2024, pp. 1–29. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
20. Dwivedi R., Somatkar A., Chinchani S. Modeling and optimization of roller burnishing of Al6061-T6 process for minimum surface roughness, better microhardness and roundness. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 52–65. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-52-65.
21. Chinchani S., Gadge M.G. Performance modeling and multi-objective optimization during turning AISI 304 stainless steel using coated and coated-microblasted tools. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 117–135. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-117-135. (In Russian).
22. Chinchani S., Choudhury S.K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: an optimization approach. *Measurement*, 2013, vol. 46 (4), pp. 1572–1584. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.032.
23. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (4), pp. 3730–3748. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.

Conflicts of Interest

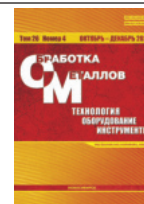
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки

Юлия Карлина^{1, а, *}, Владимир Конюхов^{2, б}, Татьяна Опарина^{2, в}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, г. Москва, 129337, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>,  jul.karlina@gmail.com; ^б  <https://orcid.org/0000-0001-9137-9404>,  konyukhov_vyu@mail.ru;

^в  <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>,  martusina2@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.002

История статьи:

Поступила: 14 сентября 2024

Рецензирование: 08 октября 2024

Принята к печати: 17 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Аддитивное производство
Электродуговое выращивание
WAAM
Проволока
Структура
Ультразвуковое упрочнение
Твёрдость
Предел текучести
Поры
Газ

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивное производство – это технология, которая позволяет печатать трехмерные (3D) компоненты слой за слоем в соответствии с цифровыми моделями. Полностью отличаясь от традиционных методов изготовления, таких как литье,ковка и механическая обработка, аддитивное производство представляет собой процесс изготовления, близкий к чистой форме, который может значительно расширить свободу проектирования и сократить время выполнения производства. Проблемы обработки материалов в Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) обусловлены достижением показателей производительности, связанных с геометрическими, физическими и материальными свойствами. Жесткие допуски и строгие требования к целостности поверхности не могут быть достигнуты путем использования автономных технологий АМ. Поэтому детали WAAM обычно требуют некоторой постобработки для соответствия требованиям, связанным с отделкой поверхности, размерными допусками и механическими свойствами. Не удивительно, что интеграция АМ с технологиями постобработки в одно- и много-этапные решения по обработке, обычно называемые гибридными АМ, стала очень привлекательным предложением для промышленности. **Цель работы:** провести оценку качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки. **Методы исследования.** Для наплавки валиков выращиваемой стенки использовался робототехнический комплекс, в состав которого входят источник питания, блок управления, проволокоподающий механизм и горелка. Для ультразвуковой обработки применяли установку «Шмель». Для металлографических исследований использовали оптический и электронный микроскоп. Для выбора оптимальной скорости подачи проволоки и вольтамперной характеристики была выполнена наплавка на каждой регулировочной ступени скорости подачи проволоки и напряжения. Были проведены механические испытания на статистическое растяжение, анализ химического состава и металлографические исследования. **Результаты и обсуждение.** Газовая пористость является типичным дефектом, который возникает в процессе WAAM и должен быть устранен, поскольку он отрицательно влияет на механические свойства. Первоначально газовая пористость приводит к снижению механической прочности детали из-за повреждений от образования микротрещин. Кроме того, она часто приводит к тому, что осажденный слой имеет худшие усталостные свойства из-за пространственного распределения различных по форме и размеру структур. В наших экспериментах мы установили, что оптимальным показателем является диапазон скоростей подачи проволоки в 5...6 м/мин. Увеличение расхода защитного газа в пределах 8...14 л/мин позволяет снизить пористость в наплавленном металле практически до нуля. Механические свойства наплавленных валиков показывают, что среднее значение предела текучести после механической обработки выше, чем у образцов без обработки. Полученные данные из этих экспериментов хорошо согласуются с данными, представленными в литературе. Результаты настоящего исследования могут быть использованы в реальных технологических процессах WAAM.

Для цитирования: Карлина Ю.И., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 75–91. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-75-91.

Введение

Достижения технологии аддитивного производства (АМ) расширили области ее применения, и АМ становится жизнеспособным вариантом для производства полностью функциональных металлических деталей [1–3]. Фактически металлическое АМ в настоящее время

*Адрес для переписки

Карлина Юлия Игоревна, к.т.н., научный сотрудник
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26,
129337, г. Москва, Россия
Тел.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

применяется в различных отраслях народного хозяйства [3–5]. Одним из способов АМ является технология проволоочно-дугового выращивания (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM). Среди всех существующих методов АМ аддитивное производство с использованием проволоки и дуги (WAAM) известно как относительно недорогой метод, который обеспечивает самые высокие скорости осаждения [1–5]. По этой технологии процесс осаждения осуществляется на открытом воздухе с использованием роботизированного манипулятора с закрепленной сварочной горелкой и локализованной экранированной зоной [5–15].

Важной задачей в обеспечении структурной целостности компонентов WAAM является оценка влияния процессов сварки, встроенных в технологию WAAM, на механические свойства и свойства разрушения по сравнению с данными, полученными из деформированного материала. Технология WAAM позволяет создавать детали со сложной топологически оптимизированной геометрией, с внутренними полостями, которые невозможно изготовить с помощью традиционных производственных процессов. Однако в большинстве случаев жесткие допуски и строгие требования к целостности поверхности не могут быть достигнуты путем использования автономных технологий АМ. Поэтому детали WAAM обычно требуют некоторой постобработки для соответствия требованиям, связанным с отделкой поверхности, размерными допусками и механическими свойствами.

В большинстве работ, посвященных аддитивному производству, описана интеграция АМ с технологиями постобработки в одно- или многоустановочные решения по обработке, обычно называемые гибридными АМ. Гибридные АМ стали очень привлекательным предложением для промышленности, что увеличило количество работ НИОКР [5–15] с целью развития этого направления. Комбинация аддитивных и субтрактивных методов предлагает возможный метод преодоления этой присущей процессу проблемы. Важно еще понимать, и это показано в многочисленных работах [10–18], что детали АМ могут содержать пустоты или поры из-за захваченного газа или неполного сплавления во время процесса печати и это может ослабить структурную целостность компонента.

В работах [4–9] указывают на пример, который был реализован в процессе Shape Deposition Manufacturing (SDM) в Стэнфордском университете и в процессе Controlled Material Buildup (CMB), разработанном в IPT Aachen. В этих процессах каждый слой наносится в виде почти чистой формы с использованием термического напыления, в основном лазерной наплавки. Затем слой дополнительно формируется фрезерованием с ЧПУ до чистой формы перед добавлением следующего слоя. В процессах SDM верхняя и боковые поверхности каждого слоя обрабатываются, а затем защищаются путем добавления медной опорной структуры. Эта опорная структура затем удаляется с помощью процесса травления, когда деталь готова.

В работе [4] авторы разработали аналогичный подход, 3D-сварку и фрезерование, используя WAAM вместо лазерной наплавки для более быстрого и экономичного нанесения отдельных валиков. В процессе 3D-сварки и фрезерования обычная газовая дуговая сварка металлическим электродом применяется для нанесения отдельных валиков рядом друг с другом. В зависимости от параметров сварки, таких как скорость и мощность, толщина валика варьируется от 0,5 до 1,5 мм. При нанесении слоя его верхняя поверхность обрабатывается для получения гладкой поверхности с определенной толщиной для дальнейшего нанесения. Сочетание этого процесса с торцевым фрезерованием дает явное преимущество в установке толщины слоя от 0,1 до 1 мм. Когда последовательность осаждения и торцевого фрезерования завершена, в той же установке применяется финишная обработка поверхности для удаления оставшихся ступенек на поверхности и повышения точности, близкой к чистой форме металлической детали. До настоящего времени механические свойства и микроструктура углеродистых сталей WAAM не были всесторонне охарактеризованы.

Для устранения этого пробела в знаниях авторами работ [19–22] была проведена комплексная серия испытаний на растяжение на пластинах из стали WAAM нормальной и высокой прочности, а также исследована микроструктура обеих марок стали. В работах [23, 24] были исследованы наплавленные стенки из малоуглеродистой стали на вязкость разрушения и показано преимущество метода WAAM.

В работах [22, 23] обобщаются некоторые применения процесса WAAM, касающиеся источника сварочного тепла, используемого исследователями.

Некоторые исследователи пробовали применять для WAAM способ дуговой сварки металлическим электродом в газовой среде (GMAW) [23, 24] в качестве основного инструмента для наплавки из-за его преимуществ, таких как относительно низкое разбрызгивание металла, независимое управление источником тепла и системой подачи проволоки в сочетании с дополнительной механической обработкой [25]. Другие родственные процессы, в которых плазменная горелка используется вместо GTAW, – это гибридное плазменное напыление и фрезерование (HPDM) и быстрое прототипирование на основе микроплазменной дуговой сварки (MPAW) [26, 27]. Во всех рассмотренных выше процессах осаждения металла точный контроль высоты слоя остается проблемой из-за волнообразной природы многопроходного наплавления. Чтобы получить компоненты с точной толщиной слоя, некоторые исследователи объединили фрезерование и наплавление [4–6, 25]. Эти гибридные процессы выполняют операцию фрезерования поверхности после каждого слоя, чтобы обеспечить z-точность. 3D-сварка и фрезерование, разработанные в [4, 5], объединяют наплавление GMAW с обычным процессом фрезерования для производства вставок для литья под давлением [7–12].

В работах [28–30] предлагают дополнительно использовать ультразвуковую обработку изделий, полученных по технологии WAAM. По мнению авторов, это позволит повысить механические свойства выращенных изделий. Многие параметры ультразвуковой дополнительной обработки в процессе WAAM пока еще не оптимизированы и зависят от типа оборудования, частоты, амплитуды и др.

В то же время интеграция традиционных субтрактивных технологий с WAAM может обеспечить улучшенную экономию материалов и энергии по сравнению с чистыми субтрактивными подходами. Фактически компоненты WAAM, как правило, демонстрируют высокую структурную целостность, когда параметры процесса оптимизированы, поэтому необходимо выполнять только операции механической обра-

ботки. Кроме того, ожидается, что при гибридной технологии будет очень небольшая глубина деформации поверхности. Синергетическая интеграция блока наплавки с ЧПУ-станком независимо от его марки и возраста является ключевым аспектом в гибридной технологии. Интеграция должна быть выполнена таким образом, чтобы наплавка могла действовать как дополнительная функция, не нарушая другие возможности ЧПУ-станка. Во время интеграции изменения в механических и электрических системах производятся без необходимости какой-либо фирменной информации от производителя станка или разработчика системы управления. Однако имеются механические проблемы: первая – это монтаж сварочной горелки сбоку головки шпинделя, чтобы управление наплавкой осуществлялось через тот же контроллер ЧПУ; вторая – необходимость подобрать подходящий механизм для отвода избыточного тепла, выделяемого во время сварки; третья – нужно принять соответствующие меры предосторожности для защиты элементов машины от случайного попадания брызг. Отдельно возникают проблемы с электрикой и управлением:

- 1) включение/выключение сварочно-наплавочного агрегата через программу ЧПУ;
- 2) простое и быстрое переключение между режимом наплавки и обычным режимом ЧПУ;
- 3) исключение любого прямого электрического контакта между контроллером ЧПУ и сварочным агрегатом.

Важно понимать, что серийного оборудования для осуществления комплексной (гибридной аддитивной технологии) пока не выпускается, а все работы, выполненные в этой области, связаны с модернизацией станков с ЧПУ, что не всегда оправдано с экономической точки зрения. Относительно простым с методологической точки зрения и требующим минимальных финансовых затрат на оборудование является подход, основанный на использовании отдельно технологии WAAM с другими методами обработки, которые доступны для более широкого круга исследований, с целью изучения свойств полученных материалов. В этой работе представлено исследование характеристик обработки металла, нанесенного методом WAAM с дополнительной механической и ультразвуковой обработкой.

Цель работы: провести оценку качества и механических свойств слоев металла, получаемых из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки.

Материалы и методы исследований

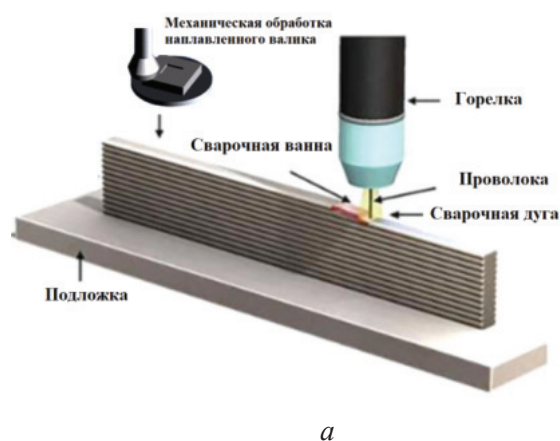
В качестве источника питания для механизированной наплавки в среде защитных газов использовался однофазный аппарат-инвертор КЕМРПИ Kemptomat 1701. В качестве защитного газа использовали смесь аргона (80 %) и CO_2 (20 %). Сварочная проволока – Св-08Г2С с медным покрытием диаметром 1,0 мм. Параметры процесса выращивания слоев (рис. 1, а) были определены для обеспечения оптимальной производительности и времени охлаждения между последовательными осаждениями слоев. Количество проходов было определено 5. После каждого прохода проводили механическую обработку поверхности наплавленного валика. Далее осуществляли визуальный контроль с использованием лупы (увеличением 10 крат) для оценки качества поверхности. После контроля наплавлялся новый слой (рис. 1, б).

Вариативными параметрами были скорость подачи проволоки и расход защитного газа. Расход газа при проведении экспериментов выбирали в диапазоне 8...12 л/мин. Это необходимо было сделать с целью оценки влияния данного параметра на пористость. При этом другие параметры – ток, скорость подачи проволоки, скорость наплавки – были постоянными. Ультразву-

ковая обработка проводилась на последнем слое наплавки в течение 1, 5, 10, 15 минут с использованием установки «Шмель Мг».

Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 1497–84. Всего было вырезано по три образца из стальной стенки, изготовленной по стандартной технологии WAAM и гибридной WAAM. Ударная вязкость (KCU) определялась в соответствии с ГОСТ 9454–78 и ГОСТ 6996. Для этого были подготовлены три образца, вырезанные из стальной стенки, изготовленной по стандартной технологии WAAM и гибридной WAAM. После завершения испытаний на ударный изгиб поверхности разрушения испытываемых образцов были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JIB-Z4500-SEM для сравнения основных видов разрушения, связанных с различными технологиями формирования.

Для микроструктурного анализа металлографические образцы были извлечены из стенки вдоль направлений выращивания, отполированы в соответствии со стандартными процедурами до чистоты поверхности 1 мкм, протравлены 4%-м водным раствором азотной кислоты и исследованы с помощью оптического микроскопа «МикроМед 2». Измерения твердости проводились в разных местах и ориентациях стенки, включая нижнюю, среднюю и верхнюю зоны, с использованием микротвердомера Shimadzu HBR-VU-187 с нагрузкой 200 г и временем выдержки 15 с.



а



б

Рис. 1. Схема процесса наплавки валиков (а) и пластина с наплавленными валиками (б)

Fig. 1. Schematic diagram of the bead surfacing process (a) and a plate with surfaced beads (б)

Результаты исследований

На рис. 2, 3 представлены результаты влияния скорости подачи проволоки и расхода защитного газа на пористость металла. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5 на рис. 2 показано количество валиков наплавки. На рис. 3 показано влияние расхода защитного газа на пористость. Видно, что с увеличением расхода пористость в наплавленном металле снижается до нуля.

На рис. 4 показаны результаты влияния механической зачистки после каждого слоя наплавки на качество поверхности и геометрические размеры валика наплавки. Видно, что использование механической обработки влияет на высоту валика наплавки и качество шва (рис. 5).

Микроструктура материала наплавленных валиков, показанная на рис. 6, состоит из полигонального феррита (PF) и межзеренного пластинчатого перлита (P).

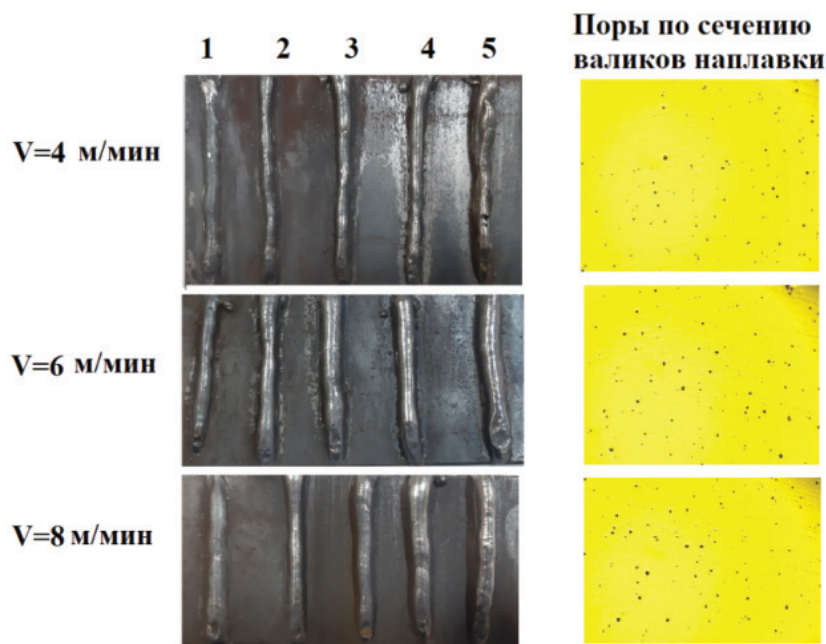


Рис. 2. Влияние скорости подачи проволоки на пористость по сечению валика наплавки

Fig. 2. Effect of wire feed speed on porosity across the surfaced bead cross section

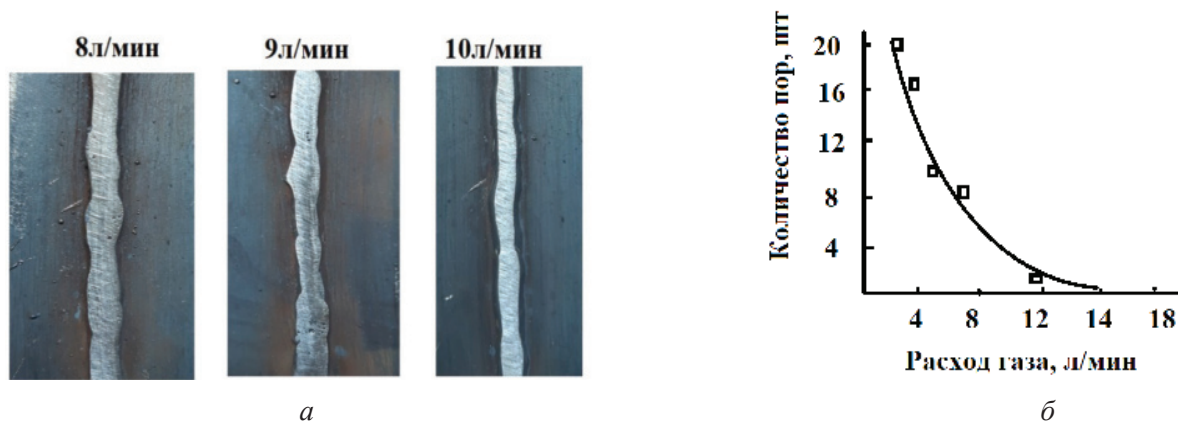


Рис. 3. Влияние расхода защитного газа на пористость в наплавленном валике (а) и график зависимости количества пор от расхода газа (б)

Fig. 3. Effect of shielding gas flow rate on porosity in surfaced beads (a) and a graph of the dependence of the number of pores on the gas flow rate (b)

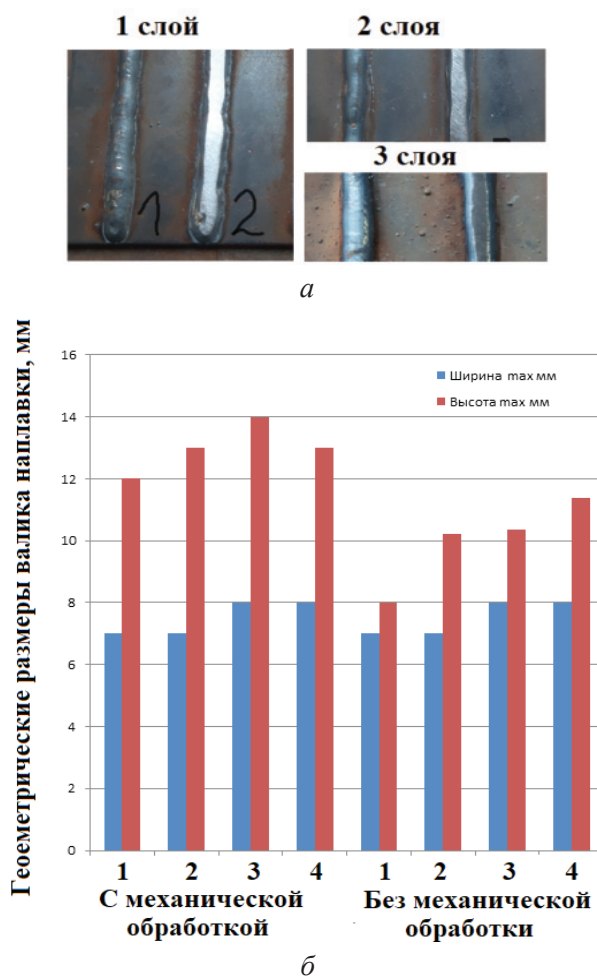


Рис. 4. Внешний вид наплавленных валиков с механической обработкой и без нее:

а – 1, 2, 3 прохода; б – влияние механической обработки на геометрические параметры валика наплавки в зависимости от количества проходов (1, 2, 3, 4 – количество проходов)

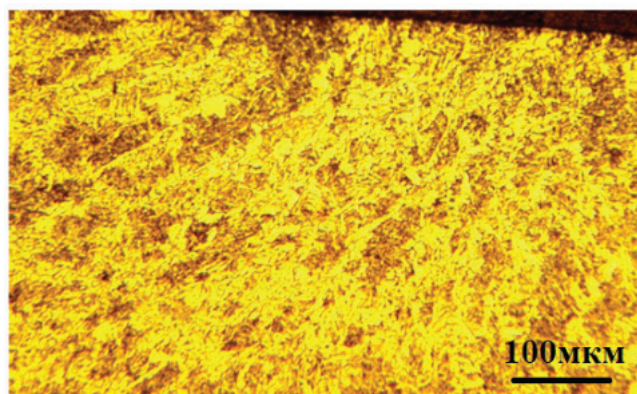
Fig. 4. Outside appearance of surfaced beads with and without machining:

а – 1, 2, 3 passes; б – the effect of machining on the geometric parameters of the surfaced bead depending on the number of passes (1, 2, 3, 4 – number of passes)

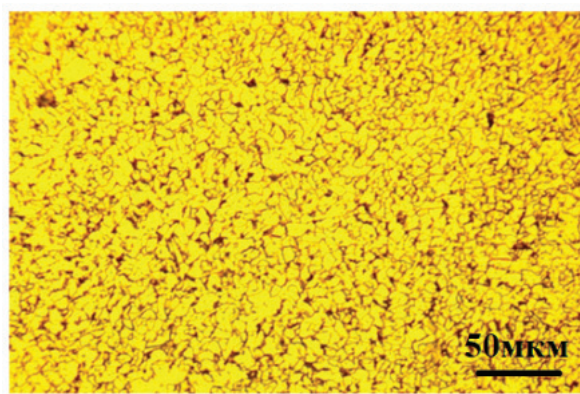


Рис. 5. Оценка качества сварного шва после механической обработки после каждого прохода

Fig. 5. Assessment of weld quality after machining after each pass



а



б

Рис. 6. Микроструктура металла в районе стыка после отпуска

Fig. 6. Microstructure of metal in the joint area after tempering

В табл. 1, 2 представлены результаты испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб. Видно, что механическая обработка повышает предел текучести и выносливости наплавленного металла по сравнению результатами без обработки. Значения ударной вязкости тоже отличаются, когда используется дополнительная механическая обработка. На фрактографиях изломов (рис. 7, б) видно, что в образцах без механической обработки присутствуют поры, что снижает значения ударной вязкости.

Результаты испытаний ультразвуковой обработки верхнего валика представлены на рис. 8. Следы пластической деформации видны на снимке микроструктуры (рис. 8, а). Время обработки влияет на значения микротвердости (рис. 8, б).

Результаты и их обсуждение

Согласно многочисленным работам, посвященным аддитивному производству с использованием дуговой сварки (WAAM) [2–10, 18–28], для получения превосходного качества наплавленного металла без каких-либо дефектов необходим тщательный выбор и реализация комбинации параметров процесса, таких как диаметр проволоки, скорость подачи проволоки, скорость перемещения, сварочное напряжение, сварочный ток, расстояние от сопла до изделия, угол горелки защитного газа и шаговое расстояние. Основная проблема технологии WAAM заключается в решении вопроса о том, следует ли увеличить скорость осаждения наплавленного металла или уменьшить распределение подвода

Таблица 1

Table 1

Результаты испытаний на статическое растяжение

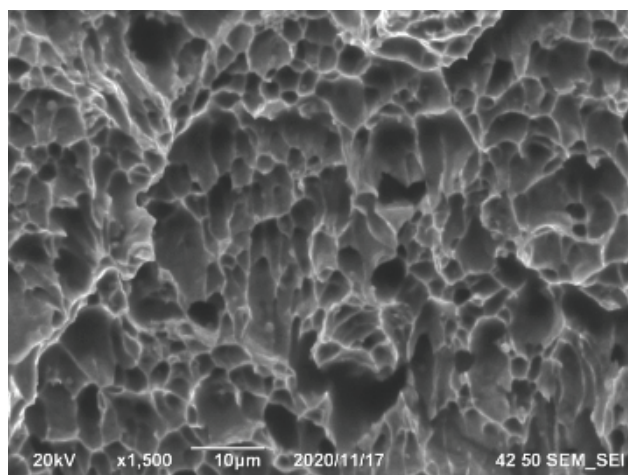
Results of static tensile tests

Клеймо (номер) образца / Specimen identification mark	Температура испытаний, °C / Test temperature, °C	Предел текучести, σ_T ($\sigma_{0.2}$) МПа / Yield strength, σ_y ($\sigma_{0.2}$) МПа	Временное сопротивление, σ_B , МПа / Ultimate strength, σ_u , МПа	Относительное удлинение, δ_5 (δ_{10}), % / Relative elongation, δ_5 (δ_{10}), %
1	20	364; 356; 361	474; 479; 481	16,75; 17,01; 16,82
2 с механ. обработкой	20	404; 410; 412	518; 522; 527	33,25; 33,01; 32,48
Сталь 09Г2С (ГОСТ)		265	430	21
Сталь 09Г2С Факт	20	275; 270; 278	435; 431; 440	22,01; 22,12; 22,34

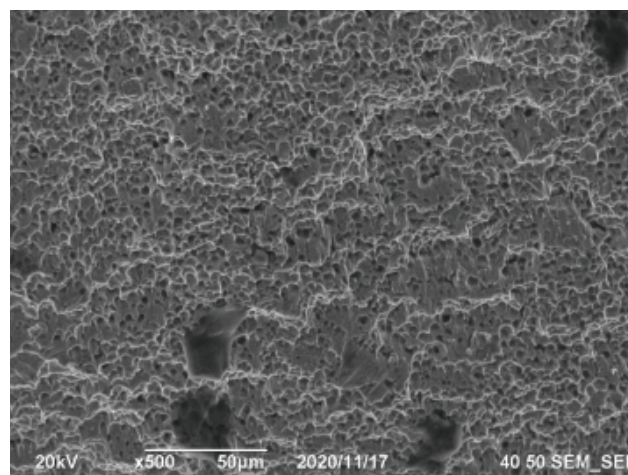
Результаты испытаний на ударный изгиб

Results of impact bending tests

Клеймо (номер) образца / Specimen identification mark	Температура испытаний, °C / Test temperature, °C	Геометрические размеры образца / Geometric dimensions of the specimen			Работа разрушения (KU), кг/см / Work of fracture (KU), kg/cm	Ударная вязкость (KCU), Дж/см ² / Impact strength, (KCU), J/cm ²	Примечание / Note
		Ширина, мм / Width, mm	Высота, мм (в месте нанесения надреза) / Height, mm (at the point of incision)	Площадь поперечного сечения, см ² / Cross-sectional area, cm ²			
4	20	9,95	7,94	0,790	15,6	183,5	Наплавка
5	20	9,94	7,9	0,785	14,8	194,7	
6	20	10,01	7,92	0,792	21,5	255,7	Наплавка с механической обработкой
7	20	9,96	7,95	0,791	21,2	268,3	
Сталь 09Г2С (ГОСТ)	20					Не менее 59	
Сталь 09Г2С (Факт)	20					115	



а



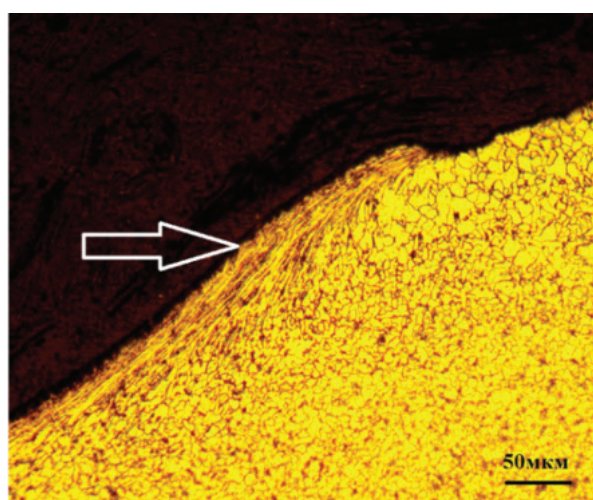
б

Рис. 7. Фрактография изломов с механической обработкой (а) и без нее (б)

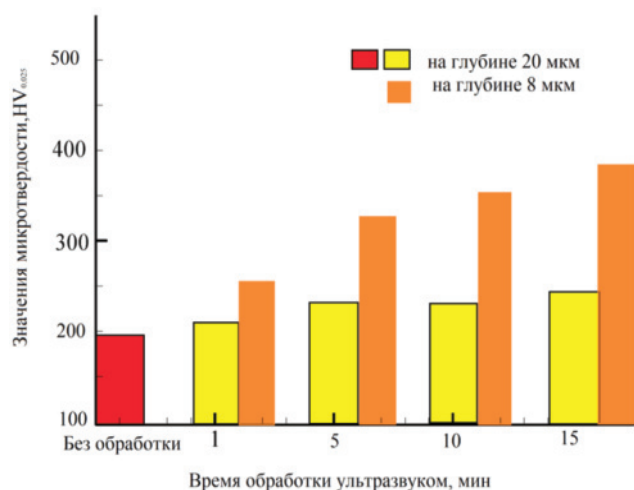
Fig. 7. Fracture analysis of specimens with machining (a) and without (b)

тепла. Это обусловлено тем, что скорость подачи проволоки тесно связана с необходимым подводом тепла [15–20] для ее расплавления. В наших экспериментах мы установили, что оптимальным показателем является диапазон

скоростей подачи проволоки 5...6 м/мин. В то же время мы видим, что при таких параметрах возникает еще один фактор, который необходимо учитывать, – пористость валика наплавки (см. рис. 2).



а



б

Рис. 8. Результаты ультразвукового упрочнения верхнего валика (а) и распределение твердости в поверхностном слое (б)

Fig. 8. Results of ultrasonic hardening of the top bead (a) and hardness distribution in the surface layer (b)

Известно, что газовая пористость является типичным дефектом, который возникает в процессе WAAM и должен быть устранен, поскольку он отрицательно влияет на механические свойства [23, 24]. Первоначально газовая пористость приводит к снижению механической прочности детали из-за повреждения от образования микротрещин. Кроме того, она часто приводит к тому, что осажденный слой имеет худшие усталостные свойства из-за пространственного распределения различных по форме и размеру структур [24].

Другим фактором, способствующим образованию пористости в слоистой структуре, является преобладание поверхностных загрязнителей в сырье, таких как влага, примеси и жир. Газовые поры обычно захватываются в самом верхнем слое зоны сплавления и распределяются по направлению к верхней части затвердевшей расплавленной ванны. Когда тонкие оксидные пленки быстро образуются на поверхности расплавленной ванны, они легко поглощают молекулярный водород и влагу из воздуха, что затем увеличивает количество водорода, присутствующего в верхней части каждого слоя. В результате обычно больше захваченного водорода и мелких микропор находится в зоне линии сплавления каждого слоя; они могут расти и объединяться в более крупные поры при воздействии высоких температур. Следовательно, более крупные поры часто наблюдаются вдоль зоны линии

сплавления между слоями. Пористость является одним из наиболее распространенных и нежелательных дефектов, который сильно ухудшает такие свойства сварных швов, как прочность и усталость.

Результаты нашего исследования показывают, что скорость потока защитного газа влияет на качество детали. Увеличение скорости потока газа снижает пористость в пределах исследуемого диапазона. Испытания трека одиночного сканирования, проведенные в исследовании [24], показывают, что даже при треках одиночного сканирования геометрия ванны расплава существенно зависит от условий потока защитного газа. В наших экспериментах (рис. 3) видно, что увеличение расхода защитного газа в пределах 8...14 л/мин позволяет снизить пористость в наплавленном металле практически до нуля. Поры, захваченные газом, имеют сферическую форму (рис. 3). Поры развиваются в течение всего времени процесса из-за захвата газа, пересыщения растворенных газов и химической реакции внутри расплавленной ванны, что приводит к образованию газообразных продуктов [23, 24]. Когда равновесное давление газа превышает сумму его гидростатического, атмосферного и капиллярного давлений, существует большая вероятность зарождения запертых газовых дырок. Зародышеобразующие поры приводят к вакансиям [18, 21], позволяя пересыщенным газам проникать в расплавленную ванну. Когда происходит бы-

строе охлаждение, места зарождения пор могут быть захвачены расплавленной ванной. С другой стороны, более медленные скорости охлаждения позволяют этим порам увеличиваться и иногда объединяться с соседними порами. В дальнейшем предложенное нами механическое шлифование позволяет еще больше снизить пористость металла за счет удаления дефектного слоя после наплавки, а также за счет удаления окисленного металла (рис. 4, 5).

В наших экспериментах зафиксировано, что скорость подачи проволоки влияет на характеристики наплавленного валика, включая высоту шва, ширину шва и угол контакта (рис. 4, б). Влияние скорости подачи проволоки на ширину шва сложно контролировать. Первоначально ширина нанесенного валика достигает максимального значения, но затем начинает уменьшаться по мере увеличения скорости подачи проволоки. Это связано с тем, что угол контакта продолжает увеличиваться со скоростью подачи проволоки, поэтому недостаточное смачивание оказывает отрицательное воздействие на валик наплавки. Ток и напряжение дуги являются другими важными элементами в процессе оптимизации WAAM. Это основные параметры управления процессом, которые регулируют количество подаваемого и рассеиваемого тепла, тем самым влияя на осаждение сварного шва. Важно предотвратить неравномерное осаждение валиков и плохую шероховатость поверхности. Кроме того, чрезмерный приток тепла может привести к повторному расплавлению ранее осажденных слоев, что отрицательно скажется на микроструктуре, размерах валика и его механических характеристиках. Важно оптимизировать ток и напряжение для повышения общей эффективности процесса. Это позволяет получить оптимальное количество тепла, необходимое для расплавления металлов в процессе WAAM. Тем самым минимизируются дефекты, такие как волнистая морфология поверхности, неравномерные отложения слоев и время, необходимое для последующей обработки.

Микроструктура материала наплавленных валиков, показанная на рис. 6, состоит из полигонального феррита (PF) и межзеренного пластинчатого перлита (P), что согласуется с работами других авторов по WAAM с низкоуглеродистыми проволоками [25]. Поэтому ана-

лиз размера зерна был выполнен на материале WAAM на основе микрофотографий (рис. 6, б). Размер зерна составил 25...35 мкм по сравнению с традиционной сваркой проволокой Св-08Г2С [24, 25]. Размер зерна обычно увеличивается по мере роста валиков с увеличением расстояния от основной пластины; это происходит из-за более медленного охлаждения вдали от пластины из-за уменьшающегося влияния эффекта теплоотвода [3–5, 22].

В WAAM затвердевание представляет собой серьезную проблему обработки материалов из-за продвижения микроструктуры, содержащей крупные столбчатые зерна.

Механические свойства наплавленных валиков представлены в табл. 1. Видно, что дополнительная механическая обработка каждого валика повышает механические свойства.

В табл. 2 представлены результаты испытаний на ударную вязкость образцов. Значения ударной вязкости с дополнительной механической обработкой выше благодаря устранению пористости наплавленного металла (рис. 7).

Результаты ультразвукового упрочнения последнего наплавленного слоя показали (рис. 8), что оно может сгладить профиль вершины шва, улучшить его микроструктуру, повысить микротвердость и ввести полезное сжимающее остаточное напряжение в поверхностный слой. Известно, что дополнительная обработка сварных швов позволяет создать сжимающие напряжения в поверхностном слое и тем самым повысить усталостную прочность [28, 29]. В работе [28] показано, что остаточное сжимающее напряжение было создано в области ультразвукового воздействия на глубине 1,5...1,7 мм и ширине 15 мм.

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что использование промежуточной операции механической обработки наплавленного валика повышает качество металла, а финишная операция ультразвуковой обработки верхнего валика (закрывающего процесс аддитивного выращивания) увеличивает твердость поверхностного слоя. Согласно результатам исследований [28, 29] установлено, что ультразвуковая обработка сварных швов и наплавленных валиков снижает количественные значения технологических остаточных напряжений. В наших дальнейших исследованиях

мы продолжим исследование по этому вопросу с целью уточнения оптимальных параметров обработки.

Заключение

1. Установлена зависимость между геометрическими размерами наплавочных валиков и пористостью в металле с использованием механической обработки между проходами и без. Показано, что металл, сформированный новым комбинированным процессом WAAM, обладает более высоким комплексом механических свойств по сравнению с металлом, получаемым по традиционной технологии WAAM.

2. Установлено, что значения предела текучести и предела прочности на растяжение металла, сформированного комбинированным процессом WAAM, на 15–30 % выше значений, получаемых традиционным процессом WAAM. Значения ударной вязкости при испытаниях на ударный изгиб металла, сформированного комбинированным процессом WAAM, выше на 15–25 %, чем значения, получаемые традиционным процессом WAAM.

3. Показано, что ультразвуковое упрочнение последнего наплавленного слоя оказывает положительное воздействие за счет повышения микротвердости поверхностного слоя металла и создания в нем сжимающих напряжений.

Список литературы

1. ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary / F42 Committee. – West Conshohocken, PA, 2021. – URL: <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm> (accessed: 23.10.2024).
2. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *International Materials Reviews*. – 2012. – Vol. 57 (3). – P. 133–164. – DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
3. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges / T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T. Nguyen, D. Hui // *Composites, Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
4. Song Y.A., Park S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process // *Journal of Materials Processing*

Technology. – 2006. – Vol. 171 (1). – P. 35–40. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.062.

5. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

6. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2021. – Vol. 8 (2). – P. 703–742. – DOI: 10.1007/s40684-020-00302-7.

7. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 84. – P. 1001–1029. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.

8. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues / M. Srivastava, S. Rathee, V. Patel, A. Kumar, P.G. Koppad // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 21. – P. 2612–2641. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.015.

9. Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments / J.M. Flynn, A. Shokrani, S.T. Newman, V. Dhokia // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 101. – P. 79–101. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007.

10. Multi-material additive manufacturing: a systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials / A. Nazir, O. Gokcekaya, K.M. Billah, O. Ertugrul, J. Jiang, J. Sun, S. Hussain // *Materials & Design*. – 2023. – Vol. 226. – P. 111661. – DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661.

11. New trends in 4D printing: a critical review / S. Vatanparast, A. Boschetto, L. Bottini, P. Gaudenzi // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13 (13). – P. 7744. – DOI: 10.3390/app13137744.

12. Study of the effect of nanomodifiers from silicon production wastehs on morphological form of gray cast iron graphites / A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.D. Kolosov, Y.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review*. – 2021. – Vol. 21. – P. 64–69. – DOI: 10.17580/cisirs.2021.01.11.

13. Bead shape control in wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V / C. Wang, W. Suder, J. Ding, S. Williams // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68. – P. 1849–1859. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.009.

14. A review of WAAM for steel construction – manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions / S.I. Evans, J. Wang, J. Qin, Y. He, P. Shepherd, J. Ding // *Structures*. – 2022. – Vol. 44. – P. 1506–1522. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.084.

15. *Kawalkar R., Dubey H.K., Lokhande S.P.* Wire arc additive manufacturing: a brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys // *Materials Today: Proceedings.* – 2022. – Vol. 50. – P. 1971–1978. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.329.
16. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // *Metals.* – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.
17. Recent advances on high-entropy alloys for 3D printing / C. Han, Q. Fang, Y. Shi, S.B. Tor, C.K. Chua, K. Zhou // *Advanced Materials.* – 2020. – Vol. 32 (26). – P. 1903855. – DOI: 10.1002/adma.201903855.
18. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment / M. Diao, C. Guo, Q. Sun, F. Jiang, L. Li, J. Li, D. Xu, C. Liu, H. Song // *Materials Science and Engineering: A.* – 2022. – Vol. 857. – P. 144044. – DOI: 10.1016/j.msea.2022.144044.
19. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes / C. Hodonou, M. Balazinski, M. Brochu, C. Mascle // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2019. – Vol. 103. – P. 1509–1517. – DOI: 10.1007/s00170-019-03613-5.
20. Process selection charts based on economy and environment: subtractive or additive manufacturing to produce structural components of aircraft / C. Hodonou, O. Kerbrat, M. Balazinski, M. Brochu // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing.* – 2020. – Vol. 14. – P. 861–873. – DOI: 10.1007/s12008-020-00663-y.
21. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels / C. Huang, P. Kyvelou, R. Zhang, T.B. Britton, L. Gardner // *Materials & Design.* – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110544.
22. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) / A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, A.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review.* – 2021. – Vol. 22. – P. 66–71. – DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.12.
23. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components / A. Ermakova, A. Mehmanparast, S. Ganguly, N. Razavi, F. Berto // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* – 2020. – Vol. 109. – P. 102685. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.
24. Study of impact strength of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM) / A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, V.V. Kondratyev, Yu.I. Karlina // *CIS Iron and Steel Review.* – 2022. – Vol. 24. – P. 67–73. – DOI: 10.17580/cisirs.2022.02.10.
25. Porosity reduction in metal with hybrid wire and arc additive manufacturing technology (WAAM) / A.I. Karlina, V.V. Kondratyev, A.E. Balanovskiy, N.A. Astafyeva, E.A. Yamshchikova // *CIS Iron and Steel Review.* – 2024. – Vol. 27. – P. 91–95. – DOI: 10.17580/cisirs.2024.01.14.
26. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material / P. Kyvelou, H. Slack, D.D. Mountanou, M.A. Wadee, T.B. Britton, C. Buchanan, L. Gardner // *Materials & Design.* – 2020. – Vol. 192. – P. 108675. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108675.
27. Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire / Z. Lin, C. Goulas, W. Ya, M.J.M. Hermans // *Metals.* – 2019. – Vol. 9 (6). – P. 673. – DOI: 10.3390/met9060673.
28. Review: The metal additive-manufacturing technology of the ultrasonic-assisted wire-and-arc additive-manufacturing process / Y. Cao, Y. Zhang, W. Ming, W. He, J. Ma // *Metals.* – 2023. – Vol. 13. – P. 398. – DOI: 10.3390/met13020398.
29. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review / S. Kumar, C.S. Wu, G.K. Padhy, W. Ding // *Journal of Manufacturing Processes.* – 2017. – Vol. 26. – P. 295–322. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.
30. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off / M.G. Shtayger, A.E. Balanovskiy, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 560 (1). – P. 012190. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.
31. 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 (1). – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
32. Wire and arc additive manufactured steel: tensile and wear properties / C.V. Haden, G. Zeng, F.M. Carter III, C. Ruhl, B.A. Krick, D.G. Harlow // *Additive Manufacturing.* – 2017. – Vol. 16. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.010.
33. Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components / P. Dirisu, S. Ganguly, A. Mehmanparast, F. Martina, S. Williams // *Materials*

als Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 765. – P. 138285. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138285.

34. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyskin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126 (1). – P. 012016. – DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

35. Research on the possibility of lowering the manufacturing accuracy of cycloid transmission wheels with intermediate rolling elements and a free cage / E.A. Efremkov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebea, M.V. Grechneva, A.V. Olisov, A.D. Ens // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 5. – DOI: 10.3390/app12010005.

36. *Martyushev N.V., Skeebea V.Yu.* The method of quantitative automatic metallographic analysis // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803 (1). – P. 012094. – DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

37. *Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V.* Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194 (2). – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

38. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeebea, P.Yu. Skeebea, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87 (8). – P. 082061. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

39. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

40. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях

гибридной технологии электрохимической обработки коррозионностойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

41. 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. Skeebea, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

42. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, V. Van Huy, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012013. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

43. Capability enhancement of production of activating fluxes for arc welding using ultradispersed products of silicon waste processing / N.N. Ivanchik, A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, I.A. Sysoev, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012035. – DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012035.

44. *Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A.* Studying the microstructure, phase composition, and wear resistance of alloyed layers after laser surface melting of low-carbon steel 20 // Metallurgist. – 2024. – Vol. 68. – P. 757–766. – DOI: 10.1007/s11015-024-01782-7.

45. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting / A.I. Karlina, Y.I. Karlina, V.V. Kondratiev, R.V. Kononenko, A.D. Breki // Crystals. – 2023. – Vol. 13 (12). – P. 1696. – DOI: 10.3390/cryst13121696.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



Assessment of the quality and mechanical properties of metal layers from low-carbon steel obtained by the WAAM method with the use of additional using additional mechanical and ultrasonic processing

Yulia Karlina^{1, a, *}, Vladimir Konyukhov^{2, b}, Tatiana Oparina^{2, c}

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6519-561X>, jul.karlina@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0001-9137-9404>, konyukhov_vyu@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-9062-6554>, martusina2@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 September 2024

Revised: 08 October 2024

Accepted: 17 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Additive Manufacturing

Wire and arc additive manufacturing

WAAM

Wire

Structure

Ultrasonic hardening

Hardness

Yield strength

Pores

Gas

ABSTRACT

Introduction. Additive manufacturing is a technology that enables three-dimensional (3D) components to be printed layer by layer according to digital models. Completely different from traditional manufacturing methods such as casting, forging, and machining, additive manufacturing is a near net shape manufacturing process that can greatly enhance design freedom and reduce manufacturing runtime. The material processing challenges in Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) are related to achieving performance metrics related to geometric, physical, and material properties. Tight tolerances and stringent surface integrity requirements cannot be achieved by utilizing stand-alone AM technologies. Therefore, WAAM parts typically require some post-processing to meet requirements related to surface finish, dimensional tolerances and mechanical properties. It is therefore not surprising that the integration of AM with post-processing technologies into single and multi-setup machining solutions, commonly referred to as hybrid AM, has become a very attractive proposition for industry. **The purpose of the work** is to evaluate the quality and mechanical properties of the resulting metal layers of mild steel by WAAM method using additional mechanical and ultrasonic processing. **Research Methods.** To conduct the experiments, a set of welding equipment was used — a single-phase inverter device KEMPPi Kempomat 1701, designed for welding with wire in shielding gases. A mixture of argon and carbon dioxide (80 % argon and 20 % CO₂) was used as a shielding gas. SV-08G2S (0.8 C-2 Mg-Si) wire was used as the surfacing material. A plate made of steel St3 with overall dimensions 150×100×5 mm was used as a base for surfacing. The surface of the plate before surfacing was thoroughly cleaned from the layer of oxides, oil, rust and other contaminants. For this purpose mechanical cleaning of the surface was used with BOSCH abrasive wheel with a diameter of 125 mm diameter and a grit size of 120. Before surfacing the surface of the product was degreased with white spirit. The gas flow rate was set at 8 dm³/min. To select the optimal wire feed rate and volt-ampere characteristic, surfacing was performed at each adjustment step of wire feed rate, and voltage. Mechanical statistical tensile tests, chemical composition analysis and metallographic studies were also performed. **Results and Discussion.** Gas porosity is a typical defect that occurs during the WAAM process and should be eliminated because it adversely affects the mechanical properties. Initially, gas porosity leads to a reduction in the mechanical strength of the part due to damage from microcrack formation. In addition, it often causes the surfaced layer to have worse fatigue properties due to the spatial distribution of different shape and size structures. In our experiments we found that a wire feed speed range of 5–6 m/min is optimal. Increasing the flow rate of shielding gas in the range of 8–14 l/min allows reducing porosity in the surfaced metal to almost zero. The mechanical properties of the surfaced beads show that the average value of yield strength after machining is higher than that of unprocessed specimens. The data obtained from these experiments are in good agreement with those reported in the literature. The presented results can be used in real WAAM technological processes.

For citation: Karlina Yu.I., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Assessment of the quality and mechanical properties of metal layers from low-carbon steel obtained by the WAAM method with the use of additional using additional mechanical and ultrasonic processing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 75–91. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-75-91. (In Russian).

* Corresponding author

Karlina Yulia I., Ph.D. (Engineering), Research Associate
National Research Moscow State Construction University,
Yaroslavskoe shosse, 26,
129337, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 914 879-85-05, e-mail: jul.karlina@gmail.com

References

1. ISO/ASTM 52900. *Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary*. F42 Committee. West Conshohocken, PA, 2021. Available at: <https://www.astm.org/Standards/ISOASTM52900.htm> (accessed 23.10.2024).
2. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57 (3), pp. 133–164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
3. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites, Part B: Engineering*, 2018, vol. 143, pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
4. Song Y.A., Park S. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 171 (1), pp. 35–40. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.062.
5. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 35, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
6. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, vol. 8 (2), pp. 703–742. DOI: 10.1007/s40684-020-00302-7.
7. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 84, pp. 1001–1029. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.
8. Srivastava M., Rathee S., Patel V., Kumar A., Koppad P.G. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 2612–2641. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.015.
9. Flynn J.M., Shokrani A., Newman S.T., Dhokia V. Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 101, pp. 79–101. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007.
10. Nazir A., Gokcekaya O., Billah K.M., Ertugrul O., Jiang J., Sun J., Hussain S. Multi-material additive manufacturing: a systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*, 2023, vol. 226, p. 111661. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661.
11. Vatanparast S., Boschetto A., Bottini L., Gaudenzi P. New trends in 4D printing: a critical review. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (13), p. 7744. DOI: 10.3390/app13137744.
12. Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Kolosov A.D., Karlina Y.I. Study of the effect of nanomodifiers from silicon production wastes on morphological form of gray cast iron graphites. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 21, pp. 64–69. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.11.
13. Wang C., Suder W., Ding J., Williams S. Bead shape control in wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, pp. 1849–1859. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.009.
14. Evans S.I., Wang J., Qin J., He Y., Shepherd P., Ding J. A review of WAAM for steel construction – manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions. *Structures*, 2022, vol. 44, pp. 1506–1522. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.084.
15. Kawalkar R., Dubey H.K., Lokhande S.P. Wire arc additive manufacturing: a brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 50, pp. 1971–1978. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.329.
16. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.
17. Han C., Fang Q., Shi Y., Tor S.B., Chua C.K., Zhou K. Recent advances on high-entropy alloys for 3D printing. *Advanced Materials*, 2020, vol. 32 (26), p. 1903855. DOI: 10.1002/adma.201903855.
18. Diao M., Guo C., Sun Q., Jiang F., Li L., Li J., Xu D., Liu C., Song H. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 857, p. 144044. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144044.
19. Hodonou C., Balazinski M., Brochu M., Mascle C. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 1509–1517. DOI: 10.1007/s00170-019-03613-5.

20. Hodonou C., Kerbrat O., Balazinski M., Brochu M. Process selection charts based on economy and environment: subtractive or additive manufacturing to produce structural components of aircraft. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2020, vol. 14, pp. 861–873. DOI: 10.1007/s12008-020-00663-y.

21. Huang C., Kyvelou P., Zhang R., Britton T.B., Gardner L. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels. *Materials & Design*, 2022, vol. 216, p. 110544. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110544.

22. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina A.I. Study of mechanical properties of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 66–71. DOI: 10.17580/cisr.2021.02.12.

23. Ermakova A., Mehmanparast A., Ganguly S., Razavi N., Berto F. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, vol. 109, p. 102685. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.

24. Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Kondratyev V.V., Karlina Yu.I. Study of impact strength of C-Mn-Si composition metal after wire-arc additive manufacturing (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2022, vol. 24, pp. 67–73. DOI: 10.17580/cisr.2022.02.10.

25. Karlina A.I., Kondratyev V.V., Balanovskiy A.E., Astafyeva N.A., Yamshchikova E.A. Porosity reduction in metal with hybrid wire and arc additive manufacturing technology (WAAM). *CIS Iron and Steel Review*, 2024, vol. 27, pp. 91–95. DOI 10.17580/cisr.2024.01.14.

26. Kyvelou P., Slack H., Mountanou D.D., Wade M.A., Britton T.B., Buchanan C., Gardner L. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. *Materials & Design*, 2020, vol. 192, p. 108675. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108675.

27. Lin Z., Goulas C., Ya W., Hermans M.J.M. Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire. *Metals*, 2019, vol. 9 (6), p. 673. DOI: 10.3390/met9060673.

28. Cao Y., Zhang Y., Ming W., He W., Ma J. Review: The metal additive-manufacturing technology of the ultrasonic-assisted wire-and-arc additive-manufacturing process. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 398. DOI: 10.3390/met13020398.

29. Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 26, pp. 295–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.

30. Shtayger M.G., Balanovskiy A.E., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina A.I., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560 (1), p. 012190. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012190.

31. 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 (1), p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

32. Haden C.V., Zeng G., Carter F.M., Ruhl C., Krick B.A., Harlow D.G. Wire and arc additive manufactured steel: tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 16, pp. 115–123. DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.010.

33. Dirisu P., Ganguly S., Mehmanparast A., Martina F., Williams S. Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 765, p. 138285. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138285.

34. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Kutyshekin A.V., Parts K.A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 126 (1), p. 012016. DOI: 10.1088/1757-899x/126/1/012016.

35. Efremenkov E.A., Martyushev N.V., Skeebe 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 (1), p. 5. DOI: 10.3390/app12010005.

36. Martyushev N.V., Skeebe V.Yu. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803 (1), p. 012094. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.

37. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194 (2), p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

38. Zverev E.A., Skeebe V.Yu., Skeebe P.Yu., Khlebova I.V. Defining efficient modes range for plasma spraying coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87 (8), p. 082061. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082061.

39. Skeebe V.Yu. Gibrinnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metallobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

40. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Issledovanie protsessa avtomaticheskogo upravleniya smenoi polyarnosti toka v usloviyakh gibrinnoi tekhnologii elektrokhimicheskoi obrabotki korrozionnostoikikh stalei [Investigation of the process of automatic control of current polarity reversal in the conditions of hybrid technology of electrochemical processing of corrosion-resistant steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

41. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe 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.

42. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Van Huy V., Karlina A.I. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

43. Ivanchik N.N., Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Sysoev I.A., Karlina A.I. Capability enhancement of production of activating fluxes for arc welding using ultradispersed products of silicon waste processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012035.

44. Karlina A.I., Karlina Y.I., Gladkikh V.A. Studying the microstructure, phase composition, and wear resistance of alloyed layers after laser surface melting of low-carbon steel 20. *Metallurgist*, 2024, vol. 68, p. 757–766. DOI: 10.1007/s11015-024-01782-7.

45. Karlina A.I., Karlina Y.I., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Breki A.D. Study of wear of an alloyed layer with chromium carbide particles after plasma melting. *Crystals*, 2023, vol. 13 (12), p. 1696. DOI: 10.3390/cryst13121696.

Conflicts of Interest

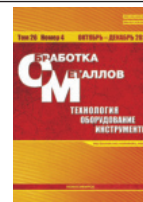
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Систематика многоинструментных наладок на станках токарной группы

Низами Юсубов^{а, *}, Хейран Аббасова^б

Азербайджанский технический университет, пр. Гусейн Джавида, 25, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан

^а  <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>,  nizami.yusubov@aztu.edu.az; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>,  abbasova.heyran@aztu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 612-113.2

История статьи:

Поступила: 17 июля 2024

Рецензирование: 19 августа 2024

Принята к печати: 17 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Систематика многоинструментных наладок

Станки токарной группы

Классификационная формула наладки

Параллельная многоинструментная обработка

Односуппортные двухкоординатные наладки

Двухсуппортные двухкоординатные наладки

Финансирование

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01.

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ заводских токарно-автоматных операций позволил выявить значительное разнообразие многоинструментных наладок и определить их область применения. Для того чтобы разработать матричную теорию точности многоинструментной обработки и создать единый алгоритмический подход к моделированию погрешностей для всех возможных пространственных многоинструментных наладок, необходимо учитывать податливость технологической системы во всех координатных направлениях. В связи с этим требуется систематизировать большое количество существующих многоинструментных наладок и провести их классификацию, чтобы структурировать информацию и улучшить понимание их применения. **Цель работы:** разработать классификацию многоинструментных наладок на многосуппортных и многоспindelных токарных станках с ЧПУ, делающую возможным создание как матричной модели точности обработки для каждого класса классификации, так и единой обобщенной матричной модели точности обработки для всего класса классификации. **В работе исследованы** систематика многоинструментных наладок, ориентированная на разработку матричных моделей точности обработки. Поэтому рассматриваемая в работе классификация направлена на выявление особенностей силового нагружения и деформирования технологической системы при многоинструментной обработке. **Методами исследования** являются выявление параметров, по которым проводится классификация, и иерархия этих параметров, определяющая уровни и порядок систематизации. Опираясь на принципы систематики многоинструментных наладок, используемых в традиционных токарных автоматах, проведен анализ их адаптации к возможностям современных токарных станков, предназначенных для многоинструментной обработки. **Результаты и обсуждение.** В результате исследования была разработана формализованная шестиступенчатая классификация многоинструментных наладок, которая включает следующие аспекты: способ установки заготовки, набор суппортов, типаж режущих инструментов, виды и направления подачи суппортов, ориентация режущих инструментов относительно заготовки и способ включения инструментов в работу (параллельно, последовательно). Эта классификация учитывает технологические возможности по организации многоинструментной обработки для современных токарных станков с ЧПУ. К основным классам предлагаемой систематики многоинструментных наладок в настоящей работе относятся односуппортные однокоординатные наладки, односуппортные двухкоординатные наладки, двухсуппортные однокоординатные наладки, двухсуппортные двухкоординатные наладки и многосуппортные наладки. Предлагаемая систематика многоинструментных наладок на станках токарной группы ориентирована на разработку моделей точности обработки и может быть взята за основу при разработке рекомендаций по режимам резания для этих станков с ЧПУ. Предложенная классификация многоинструментных наладок составляет основу методического обеспечения САПР токарно-автоматных операций и является базой для создания САПР токарных операций нового поколения.

Для цитирования: Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Систематика многоинструментных наладок на станках токарной группы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 92–111. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-92-111.

Введение

Многоинструментная обработка является одним из наиболее эффективных средств повышения производительности станочных операций

*Адрес для переписки

Юсубов Низами Дамир, д.т.н., профессор
Азербайджанский технический университет,
пр. Гусейн Джавида, 25,
AZ 1073, г. Баку, Азербайджан
Тел.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

в машиностроении [1–10]. Следует отметить, что функции металлорежущих станков постоянно расширяются, чтобы удовлетворить требованиям по высокой производительности и точности при обработке сложных и труднообрабатываемых деталей на одном станке [1–6, 11–20]. Например, в статье [2] представлен полный обзор многофункциональных станков, используемых для обработки металлов резанием, их кинематических конфигураций, технологий управления

и программирования. В статье [8] рассмотрена проблема оптимизации режимов резания на многопозиционных станках и автоматических линиях, оснащенных многошпиндельными головками. В работе [14] токарная обработка проводилась на токарном станке с двумя режущими инструментами, установленными на суппорте, один спереди, другой сзади. В ряде исследований [21–34] решены конкретные вопросы, относящиеся к проблемам проектирования многоинструментной обработки или оптимизации технологического процесса. В [30] критически оценивался потенциал применения нескольких методов моделирования и оптимизации в процессах обработки металлов, классифицированных по нескольким критериям. Однако во всех этих работах не была исследована необходимость упорядочения множества многоинструментных наладок и введение системы при их рассмотрении, т. е. проведение классификации многоинструментных наладок и создания единой алгоритмической модели погрешностей обработки для всего множества пространственных многоинструментных наладок при учете податливости технологической системы по всем координатным направлениям.

Составляющая погрешности обработки, возникающая вследствие упругих перемещений элементов технологической системы под воздействием сил резания, которую часто называют деформационной составляющей, является наиболее управляемой в процессе обработки и на стадии проектирования. Варьируя режимы резания, геометрию режущего инструмента, исходную погрешность (на промежуточной стадии обработки), а также изменяя материал режущей части, можно существенно влиять на величину погрешности обработки [4, 9, 13, 15, 16, 25, 26, 33]. Поэтому математическая модель деформационной составляющей погрешности обработки составляет основу расчетной матричной теории точности обработки [13, 14, 15, 25, 26, 33, 35, 37].

Попытки систематизации многоинструментных наладок имеются в работах Кошина А.А. [35, 36]. Им введены четыре основных уровня классификации наладок и один дополнительный. Основные классификационные показатели: вид суппорта, вид режущего инструмента, его ориентация (прижимает или отжимает заготовку от суппорта) и способ установки заготовки.

Дополнительный показатель – вид дополнительного устройства, установленного на основном суппорте. В то же время нет возможности описания целого ряда признаков, характерных для многоинструментной обработки на современных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Формализованная систематика многоинструментных наладок составляет основу методического обеспечения системы автоматизированного проектирования (САПР) токарно-автоматных операций [37]. Современные станки-автоматы, ориентированные на многоинструментную обработку и оснащенные системой ЧПУ, имеют гораздо более богатые технологические возможности по организации многоинструментной обработки. Поэтому требуется новая, более многофакторная и отражающая эти новые возможности систематика многоинструментных наладок.

Целью работы являлась разработка классификации многоинструментных наладок на многосуппортных и многошпиндельных токарных станках с ЧПУ, делающая возможным создание как матричной модели точности обработки для каждого класса классификации, так и единой обобщенной матричной модели точности обработки для всего класса классификации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Выявлены принципы классификации многоинструментных наладок.
2. Определены основные классы предлагаемой систематики многоинструментных наладок.

Методика исследований

Принципы классификации многоинструментных наладок

Основу систематики составляет комплекс классификационных показателей. Взяв за основу принципы систематики многоинструментных наладок на традиционных токарных автоматах [37], рассмотрим трансформацию показателей к возможностям современных станков токарной группы, ориентированных на многоинструментную обработку.

Ключевым вопросом систематики является выявление параметров, по которым проводится классификация, и иерархия этих параметров,

определяющая уровни и порядок систематики. Предлагаемая систематика многоинструментных наладок ориентирована на разработку моделей точности обработки. Основная особенность многоинструментной обработки – это силовое взаимовлияние инструментов наладки [31, 32]. Поэтому классификация направлена на выявление особенностей силового нагружения и деформирования технологической системы при многоинструментной обработке.

Основу схемы деформирования технологической системы при силовом нагружении в процессе обработки составляет способ закрепления заготовки. Именно он является общим, единым показателем для многоинструментной наладки. Способ установки во многом предопределяет возможные виды инструментов и схемы их размещения в наладке. Поэтому логично этот показатель поставить на первый уровень классификации многоинструментных наладок [31, 32].

Далее нужно описать виды режущих инструментов в наладке и их размещение относительно заготовки и друг друга, т. е. описать собственно структуру наладки. Основой структуры многоинструментной наладки является набор суппортов, на которых размещаются инструменты. Поэтому на втором уровне классификации должно быть описание суппортов, участвующих в наладке.

Третий уровень – это описание собственно режущих инструментов, формирующих наладку.

Введенные три фактора описывают типаж режущих инструментов и их расположение. Однако силовое воздействие инструментов на заготовку определяется силами резания, значения которых и направление действия определяются еще одним фактором – направлением подачи. Движение подачи относится к суппорту, поэтому целесообразно этот фактор приписать как дополнительный к описанию суппорта.

В многоинструментных наладках нередки случаи, когда режущий инструмент с помощью специальных державок разворачивается относительно базовых поверхностей суппорта. Поэтому вводим также показатель ориентации инструмента относительно базы суппорта или заготовки.

Классификация многоинструментных наладок на традиционных токарных автоматах охватывает наладки, где инструменты работают од-

новременно. Однако современные станки с ЧПУ, оснащенные инструментальным магазином, позволяют организовать многоинструментную обработку с последовательным использованием инструментов. Имея единую технологическую базу и работая от общей управляющей программы, эти наладки подчиняются закономерностям многоинструментной обработки в традиционном понимании этого термина. Более того, модели точности обработки позволяют учесть технологическую наследственность и выйти на проектирование многопереходной обработки. Поэтому предлагается расширить понятие многоинструментной наладки, включив сюда наладки как с одновременной работой инструментов, так и с последовательной.

Таким образом, получаем 6 уровней классификации многоинструментных наладок: способ установки заготовки, набор суппортов, типаж режущих инструментов, виды и направления подач суппортов, ориентация режущих инструментов относительно заготовки, способ включения инструментов в работу (параллельно, последовательно).

Обобщая принципы классификации многоинструментных наладок с учетом условий современных токарных станков с ЧПУ, можно разработать соответствующую классификационную формулу:

$$H \equiv Yk_y \bigcup_i \times \times \left\{ \bigcap_j \left[C_{ij} k_c(e_c) S_{ij} k_s(e_s) \left[\bigcap_k u_{ijk} k_u(e_u) \right] \right] \right\}, \quad (1)$$

где введены следующие обозначения: Y – признак способа установки; k_y – код способа установки; C_{ij} – признак суппорта; k_c – код вида суппорта; e_c – расположение суппорта; S_{ij} – признак подачи суппорта; k_s – код вида подачи суппорта; e_s – направление подачи суппорта; u_{ijk} – признак режущего инструмента; k_u – код режущего инструмента; e_u – ориентация режущего инструмента; k – номер режущего инструмента на данном суппорте; j – номер суппорта на данной рабочей позиции; i – номер рабочей позиции; $\bigcap_k$ – признак параллельной (одновременной) работы инструментов, описанных в квадратных скобках после этого знака; $\bigcap_j$ – признак параллельной (одновременной) работы суппортов, описанных в квадратных скобках после этого

знака; U_i – признак последовательной отработки всех рабочих позиций.

Для традиционных многошпиндельных токарных автоматов понятие рабочей позиции совпадает с общепринятым. Применительно к современным многоинструментным станкам с ЧПУ понятие рабочей позиции целесообразно расширить. Двухсуппортные станки с ЧПУ, оснащенные инструментальным магазином, позволяют организовать ряд последовательно сменяющих друг друга элементарных наладок с одновременной работой нескольких инструментов.

Таким образом, на современном станке с ЧПУ может быть организовано последовательное выполнение набора многоинструментных наладок, понимаемых в традиционном смысле. Поскольку аппарат расчетной теории точности многоинструментной обработки [31, 32] позволяет вести анализ и такой последовательности многоинструментных наладок, то имеет смысл ввести в рассмотрение обобщенную многоинструментную наладку, которая включает в себя

распределенную по времени последовательность традиционных многоинструментных наладок с одновременной работой нескольких инструментов. Каждый этап работы такой обобщенной наладки, относящийся к отдельному набору одновременно работающих инструментов, предлагается назвать позицией обобщенной многоинструментной наладки. Такое последовательное включение традиционных многоинструментных наладок отражено в классификационной формуле (1) оператором U с индексом i .

Наполнение классификационной формулы (1) обеспечивается системой кодификаторов. Кодификатор способов установки может быть взят из работ [35, 36], поскольку установки на станках с ЧПУ те же, что и на традиционных токарных станках – автоматах с кулачковым управлением, для которых разрабатывалась упомянутая классификация (табл. 1).

Кодификатор вида суппорта должен быть расширен для учета возможностей современных станков с ЧПУ (табл. 2)

Таблица 1

Table 1

Кодификатор способов установки заготовки
Codifier of workpiece mounting methods

№ / No.	Способ установки / Mounting method	Код k_y / Code k_y
1	В патроне, консольно	0
2	В цанге, консольно	1
3	В центрах	2
4	В патроне с задним центром	3
5	В центрах с люнетом	4

Таблица 2

Table 2

Кодификатор вида суппорта
Carriage type codifier

№ / No.	Вид суппорта / Carriage type	Код k_c / Code k_c
1	Продольный	0
2	Поперечный	1
3	Верхний	2
4	Нижний	3
5	Задний	4
6	Поворотный	5
7	Крестовый	6
8	Револьверный	7

Кодификатор режущего инструмента формируется из перечня инструмента, применяемого на всей группе токарных станков-автоматов, как традиционных (с кулачковым управлением), так и современных (с ЧПУ и инструментальными магазинами) [38].

Кодификатор вида подач для современных станков-автоматов токарной группы имеет гораздо более сложную структуру и не укладывается в рамки простой кодировочной таблицы. Во-первых, по своему характеру подачи могут быть постоянными на всем переходе (параметрическое управление) и переменными (функциональное управление). Переменные подачи задаются, как правило, в виде функции от траектории инструмента. Во-вторых, на схему распределения сил резания решающее влияние оказывает направление подачи.

В основном подачи подразделяют на продольные (вдоль оси заготовки) и поперечные (по нормали к оси заготовки). Это и было учтено в прежней систематике [35, 36] путем введения подач S_1 (продольная) и S_2 (поперечная). Однако на современных станках номенклатура подач гораздо шире. Имеются поворотные суппорты, где подача осуществляется вдоль направления, различным образом ориентированного относительно заготовки. Например, поворотный суппорт на вертикальных многошпиндельных полуавтоматах. При обработке конусных поверхностей суппорт разворачивается вдоль направляющей и осуществляет подачу в этом направлении. Такой

случай можно описать как подачу в направлении заданного вектора e_s .

Однако обработка конусной поверхности может осуществляться и другим образом – сложением двух координатных подач (продольной и поперечной). Такая схема работает на большинстве станков с ЧПУ. В итоге для описания характера подачи предлагается использовать код подачи k_s , причем специальным образом обозначать только функциональную подачу: $k_s = v$. Если подача носит параметрический характер, то код вида подачи в формуле (1) опускается.

Направление подачи задается вектором направления e_s . Предлагается для удобства чтения классификационной формулы (1) ввести специальные обозначения для ряда частных случаев (типовых) вектора e_s (табл. 3). Следует отметить, что согласно стандартам ИСО 841–74 и ГОСТ 23597–79 информацию об осях X , Y , Z , приведенную в табл. 3–11, для станков с ЧПУ следует принимать как $X \Rightarrow Z$, $Y \Rightarrow X$, $Z \Rightarrow Y$. Дело в том, что на станках с ЧПУ ось Z проходит вдоль оси шпинделя, а поперечное перемещение инструмента осуществляется по оси X . Соответствующим образом и обозначаются подачи.

Если подача формируется сложением координатных подач, то логично ее описать через операцию совмещения этих подач. Так, обработка конуса сложением продольной и поперечной подач опишется как $S(x) \cap S(y)$.

В качестве вектора e_s , характеризующего расположение суппорта, можно принять ради-

Таблица 3

Table 3

Специальные типовые обозначения вектора направления подачи
Special type designations of feed direction vector

№ / No.	Направление подачи и способ ее организации / Direction of feed and method of its organization	Задание вектора e_s / Assignment of the vector e_s
1	Подача вдоль оси X (продольная)	x
2	Подача вдоль оси Y (поперечная)	y
3	Подача вдоль оси Z (тангенциальная)	z
4	Подача в плоскости XY , перпендикулярно оси Z (разворот суппорта)	nz
5	Подача в плоскости XZ , перпендикулярно оси Y (разворот суппорта)	ny
6	Подача в плоскости YZ , перпендикулярно оси X (разворот суппорта)	nx
7	Подача в направлении, заданном вектором в пространстве XYZ	e_s

ус-вектор точки рабочей поверхности суппорта. Здесь также имеет смысл ввести ряд специальных типовых обозначений этого вектора (табл. 4).

При организации многоинструментных наладок нередки случаи, когда при установке на одном суппорте нескольких инструментов отдельные инструменты за счет применения специальных державок разворачивают относительно остальных инструментов. Например, ставят два проходных резца, развернутых друг относительно друга на 180° .

Для описания такой ситуации в формуле (1) введен вектор ориентации режущего инструмента e_u . Здесь вектор e_u характеризует направление оси режущего инструмента. По аналогии с векторами направления подачи e_s и расположения суппорта e_c в этом случае также можно ввести специальные обозначения для распространенных типовых ситуаций (табл. 5).

Поскольку разворот режущего инструмента относительно суппорта применяется нечасто, то предлагается ориентацию инструмента описывать только в случаях, когда имеет место этот

разворот. Если ориентация инструмента совпадает с ориентацией рабочих поверхностей суппорта, то элемент классификационной формулы (1), описывающий ориентацию инструмента, опускается.

Основная цель разработки моделей точности обработки в многоинструментных наладках состоит в создании эффективных алгоритмов управления процессом проектирования этих наладок и назначения режимов резания, обеспечивающих требуемую точность выполнения всех заданных размеров. Структура алгоритмов управления во многом определяется видом и количеством параметров управления. Поскольку частота вращения шпинделя при работе многоинструментной наладки едина для всех инструментов наладки, то скорость резания непосредственным фактором управления не является. Ее можно лишь учитывать для каждого инструмента. Прямым фактором управления является подача инструмента – конечно, при учете одновременности работы всех инструментов наладки.

Таблица 4

Table 4

Специальные типовые обозначения вектора расположения суппорта

Special type designations of the carriage location vector

№ / No.	Расположение суппорта / Carriage location	Пример суппорта / Carriage example	Задание вектора e_c / Assignment of the vector e_c
1	Суппорт на оси X	Револьверный	x
2	Суппорт на оси Y	Продольный на ТРА и ТМГА	y
3	Суппорт на оси Z	Вертикальный на ТРА	z
4	Суппорт на оси $-Y$	Задний на ТРА, суппорт, расположенный в верхней части двухсуппортного станка с ЧПУ	$-y$
5	Суппорт, расположенный в плоскости XY , перпендикулярный оси Z	Суппорт с функцией поворота на ТМВПА	nz
6	Суппорт, расположенный в плоскости XZ , перпендикулярный оси Y	Шпиндель с инструментами на станке с ЧПУ	ny
7	Суппорт, расположенный в плоскости YZ , перпендикулярно оси X	Поперечный суппорт на ТМГА, шпиндель с инструментами на станке с ЧПУ	nx
8	Суппорт, ориентированный в направлении, заданном вектором в пространстве XYZ	Шпиндель с инструментами на станке с ЧПУ	e_c

Таблица 5

Table 5

Специальные типовые обозначения вектора ориентации режущего инструмента
Special type designations for the orientation vector of the cutting tool

№ / No	Ориентация режущего инструмента / Orientation of the cutting tool	Задание вектора e_s / Assignment of the vector e_s
1	Вдоль оси X	x
2	Вдоль оси Y	y
3	Вдоль оси Z	z
4	В плоскости XY , перпендикулярно оси Z	nz
5	В плоскости XZ , перпендикулярно оси Y	ny
6	В плоскости YZ , перпендикулярно оси X	nx
7	В произвольном направлении в пространстве XYZ	e_u
8	Направление главной составляющей силы резания от режущего инструмента	В сторону увеличения +; в сторону уменьшения –

На станках токарной группы подача задается для суппорта в целом. Поэтому количество суппортов, используемых в наладке, уже предопределяет количество задаваемых подач, т. е. количество факторов управления. Вследствие этого целесообразно выделить три основных класса многоинструментных наладок: односуппортные, двухсуппортные и многосуппортные.

Как следует из классификационной формулы (1), на станках токарной группы, особенно современных станках с ЧПУ, по способу реализации подачи подразделяются на однокоординатные и двухкоординатные. Однокоординатные – это когда направление подачи совпадает с одной из координатных осей обрабатываемой заготовки. Двухкоординатная подача формируется сложением двух подач, каждая из которых осуществляется по своей координате. В этом случае, в отличие от первого, имеем два фактора управления – две координатные подачи.

Ниже рассмотрены основные классы предлагаемой систематики многоинструментных наладок.

Результаты и их обсуждение

Для создания матричной теории точности многоинструментной обработки было упорядочено множество многоинструментных наладок и проведена их классификация. В результате была разработана формализованная шестиуровневая классификация, включающая следующие

параметры: способ установки заготовки, набор суппортов, типы режущих инструментов, виды и направления подач суппортов, ориентация инструментов относительно заготовки и метод их активации (параллельно или последовательно). Эта классификация учитывает технологические возможности по организации многоинструментной обработки для современных токарных станков с ЧПУ. Основными классами разработанной систематики многоинструментных наладок являются односуппортные однокоординатные наладки, односуппортные двухкоординатные наладки, двухсуппортные однокоординатные наладки, двухсуппортные двухкоординатные наладки и многосуппортные наладки.

Разработанная классификация многоинструментных наладок на многосуппортных и многошпиндельных токарных станках с ЧПУ позволяет для каждого класса создать свою матричную модель точности, которая, несомненно, будет структурно проще, а также создать единую обобщенную модель. Поэтому рассматриваемая в работе классификация направлена на выявление особенностей силового нагружения и деформирования технологической системы при многоинструментной обработке.

Разработанная систематика многоинструментных наладок на станках токарной группы ориентирована на разработку моделей точности обработки и может быть взята за основу при разработке рекомендаций по режимам резания для этих станков с ЧПУ. С помощью такого подхода

можно системно решить задачу повышения эффективности при проектировании и разработке рекомендаций по режимам резания для станков с ЧПУ. Поскольку многоинструментная обработка включает в себя множество факторов, то ее проектирование неизбежно требует использования компьютерных технологий. Поэтому предложенная классификация многоинструментных наладок может служить основой для разработки методического обеспечения САПР токарных операций нового поколения.

На основе предложенной классификации в будущем предполагается создание комплекса матричных моделей точности для односуппортных и двухсуппортных многоинструментных наладок.

Основные классы предлагаемой систематики многоинструментных наладок

Односуппортные однокоординатные наладки. Односуппортные однокоординатные многоинструментные наладки на основе одного суппорта применяются на различных типах токарных станков с кулачковым управлением.

К ним относятся токарно-револьверные автоматы, токарные многошпиндельные горизонтальные автоматы и полуавтоматы, токарные многошпиндельные вертикальные полуавтоматы, а также автоматы для продольного фасонного точения и фасонно-отрезные автоматы. Такие наладки также используются на станках с ЧПУ. Они могут быть реализованы на суппортах любого типа – продольных, револьверных или поперечных. На токарно-револьверных станках поперечными суппортами считаются как верхний, так и задний.

Главной особенностью этого класса многоинструментных наладок является расположение всех инструментов наладки на одном суппорте и наличие только одного параметра управления – какой-либо координатной подачи.

В табл. 6 приведены примеры типичных наладок этого класса. Типовые наладки в них обозначены в соответствии с предложенной системой (1).

Для удобства работы в качестве приложения к каждому классификатору разработаны иллюстрированные определители наладок (табл. 7).

Таблица 6

Table 6

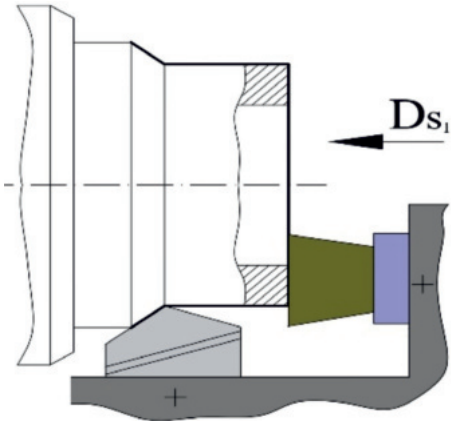
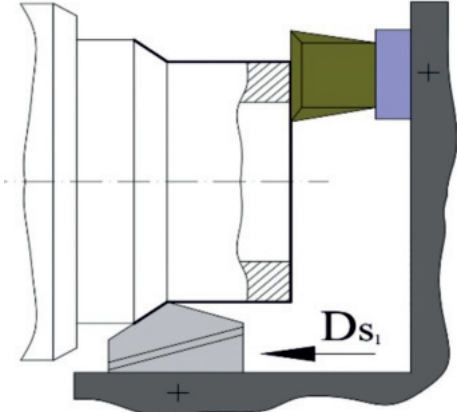
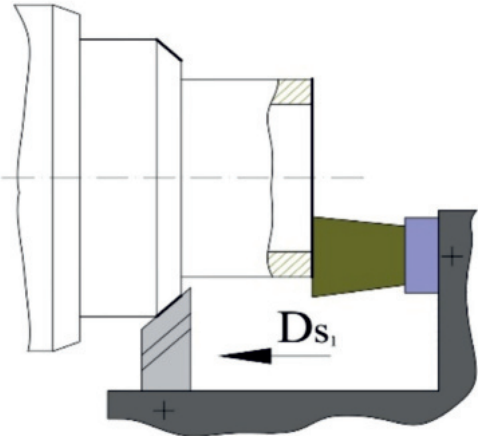
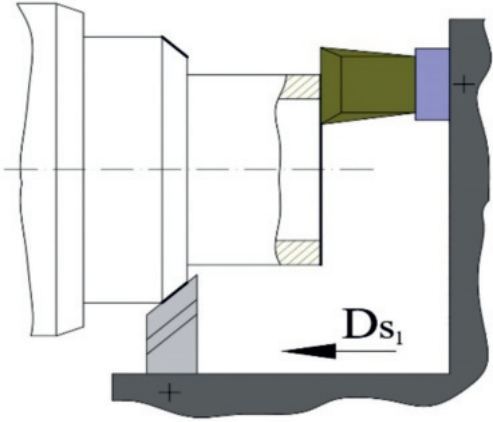
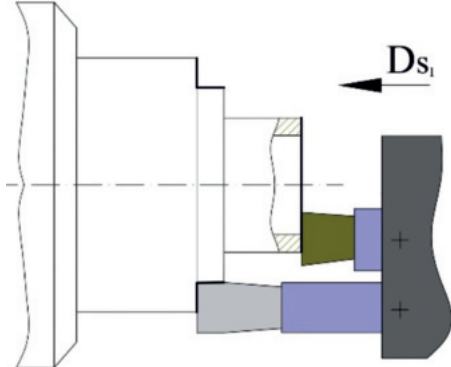
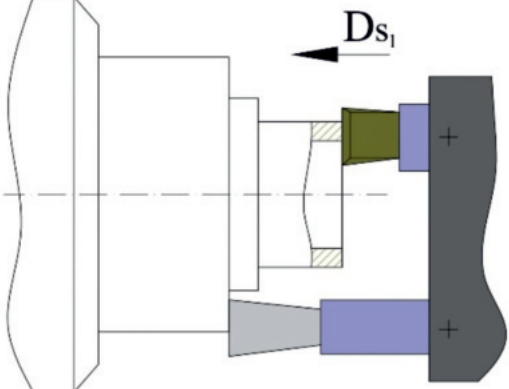
Элементы классификатора базовых многоинструментных односуппортных наладок для продольного суппорта

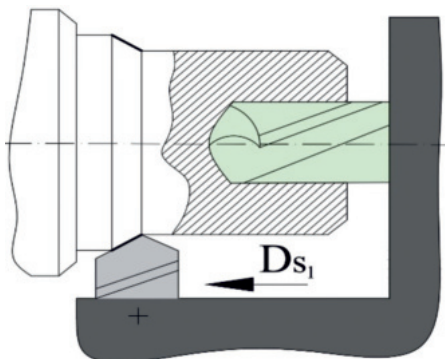
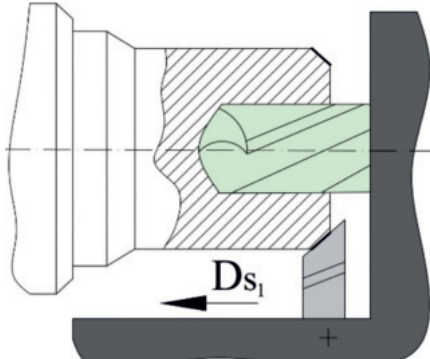
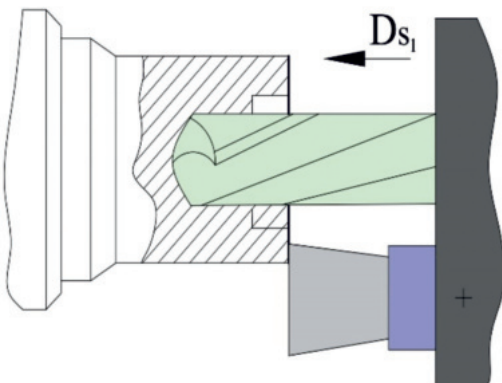
Elements of the classifier of basic multi-tool single-carriage setups for a longitudinal carriage

Инструмент		Резец для проходного точения	Резец для заточки фасок
		1	2
Обозначение наладок			
Резец для проходного точения	1	$Y0C0(y)S(x)[u_1 1(y) \cap u_2 1(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 1(y) \cap u_2 1(-y)]$	
Резец для заточки фасок	2	$Y0C0(y)S(x)[u_1 2(y) \cap u_2 1(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 2(y) \cap u_2 1(-y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 2(y) \cap u_2 2(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 2(x) \cap u_2 2(x(-y))]$
...	...	...	...
Резец фасонный (резец для точения фасонных поверхностей)	5	$Y0C0(y)S(x)[u_1 5(x) \cap u_2 1(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 5(x) \cap u_2 1(-y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 5(x) \cap u_2 2(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 5(x) \cap u_2 2(x(-y))]$
...	...	...	...
Сверло	12	$Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 1(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 1(-y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 2(y)]$ $Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 2(x(-y))]$
...	...	...	...

Фрагменты иллюстрированного определителя. Элементарные многоинструментные наладки на продольном суппорте (деталь установлена в патроне)

Fragments of the illustrated determinant. Elementary multi-tool setups on a longitudinal carriage (the part is mounted in the chuck)

Проходной резец	
$Y0C0(y)S(x)[u_1 4(x) \cap u_2 1(y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 4(x(-y)) \cap u_2 1(y)]$
	
Фасочный резец	
$Y0C0(y)S(x)[u_1 4(x) \cap u_2 2(y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 4(x(-y)) \cap u_2 2(y)]$
	
Широкий резец	
$Y0C0(y)S(x)[u_1 4(x) \cap u_2 4(y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 4(x) \cap u_2 4(x(-y))]$
	

Сверло	
$Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 1(y)]$	$Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 2(y)]$
	
$Y0C0(y)S(x)[u_1 12(x) \cap u_2 4(y)]$	
	

Примечание: красным цветом выделены рекомендуемые наладки, черным – возможные, но не рекомендуемые.

Односуппортные двухкоординатные наладки. Наладки такого типа используются на токарных станках с ЧПУ для обработки конусных и фасонных поверхностей. В этих наладках контурная подача формируется путем суммирования координатных подач – продольной (по оси X) и поперечной (по оси Y). При обработке конусных поверхностей подача остается постоянной на протяжении всего цикла обработки, т. е. управление осуществляется параметрически.

При обработке фасонных поверхностей координатные подачи согласованно изменяются в соответствии с изменением обтачиваемого фасонного контура, т. е. управление функциональное.

Эти различия существенны при разработке алгоритмов управления. Для модели точности существенно, что они имеют два фактора управления.

В табл. 8 приведены примеры применяемых наладок этого класса.

Двухсуппортные однокоординатные наладки. Многоинструментные наладки данного типа используются на двухсуппортных и многосуппортных токарных станках. В первую очередь это касается традиционных токарных автоматов и полуавтоматов с кулачковым управлением, таких как токарно-револьверные автоматы, многшпиндельные горизонтальные токарные автоматы и полуавтоматы, многшпиндельные вертикальные токарные полуавтоматы, а также автоматы для продольного точения фасонных поверхностей и фасонно-отрезные автоматы. Нередки эти наладки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ.

Характерной особенностью двухсуппортных однокоординатных наладок является наличие двух параметров управления – подачи

Примеры односуппортных двухкоординатных наладок
Examples of single-carriage two-coordinate setups

Название наладки	Инструмент	Схема наладки
Обработка наружного конуса одним инструментом с подачами по координатным осям X и Y : S_x и S_y	Резцы для проходного точения на станках с ЧПУ	$Y0C0(y)S(x)[u17(y)]$
Обработка внутреннего конуса одним инструментом с подачами по координатным осям X и Y : S_x и S_y	Резцы для расточки на станках с ЧПУ	$Y0C0(y)S(x)[u19(y)]$
Одноинструментное наружное фасонное точение с двумя подачами: S_x и S_y	Резцы для станков с ЧПУ для контурного точения	$Y0C0(y)S(x)[u18(y)]$

каждого суппорта. Однако эти параметры неравноправны. Подача того суппорта, на котором установлен инструмент, формирующий рассматриваемый размер, является фактором прямого, непосредственного управления. Подача же другого суппорта, инструменты которого формируют другие размеры, оказывает лишь косвенное влияние на точность рассматриваемого размера.

В табл. 9 приведены примеры применяемых многоинструментных наладок этого класса.

Двухсуппортные двухкоординатные наладки. Эти наладки могут быть выполнены на

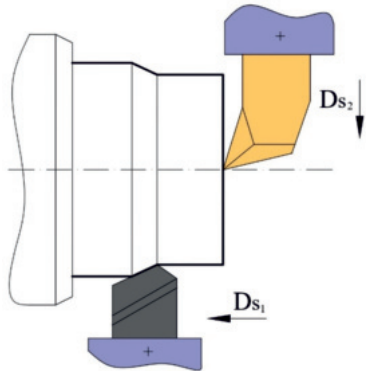
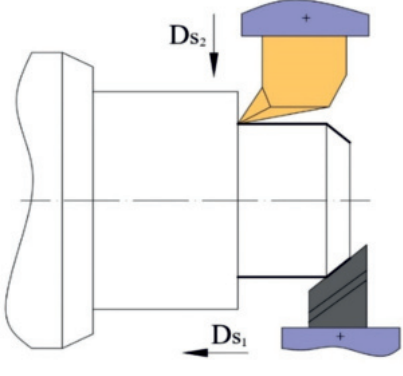
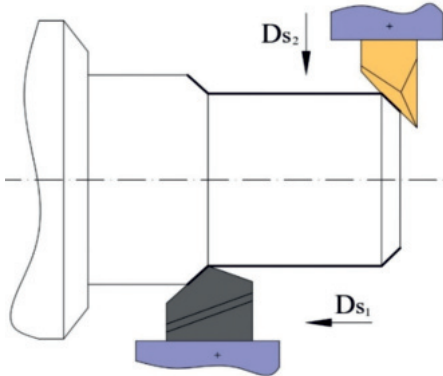
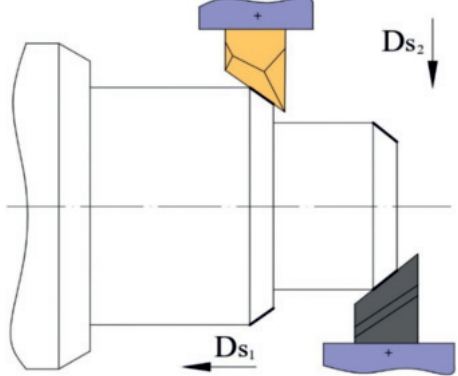
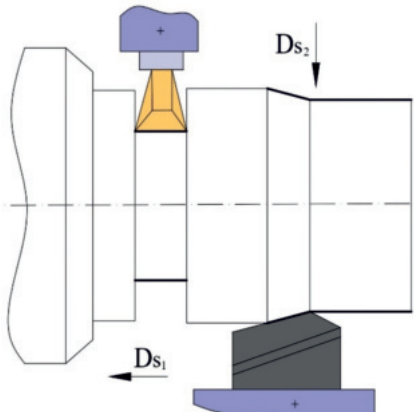
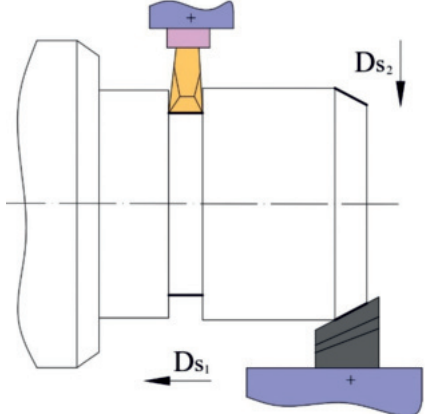
современных двухсуппортных токарных станках с ЧПУ. В общем случае на каждом суппорте обработка может вестись с управлением по двум координатным подачам. Однако даже наличие такого управления только на одном суппорте, при наличии в наладке и второго суппорта, относит наладку к этому классу.

В табл. 10 приведены примеры возможных и применяемых наладок этого класса.

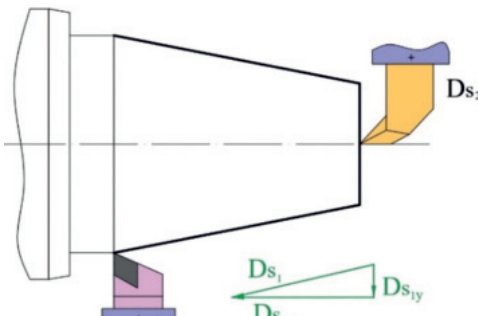
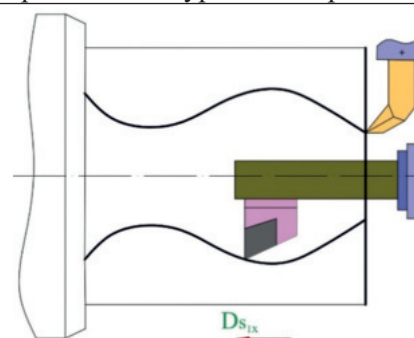
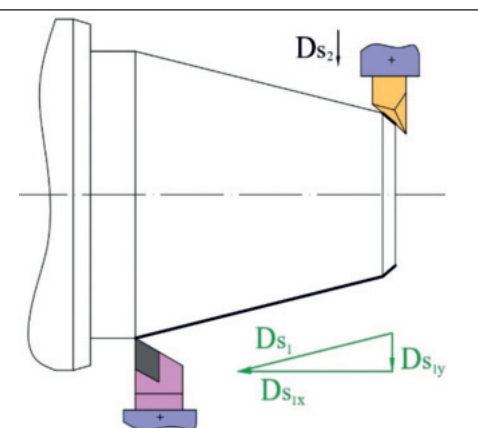
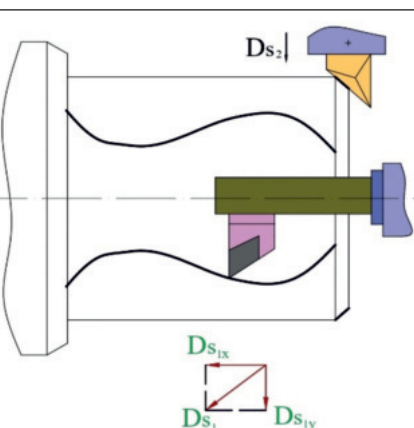
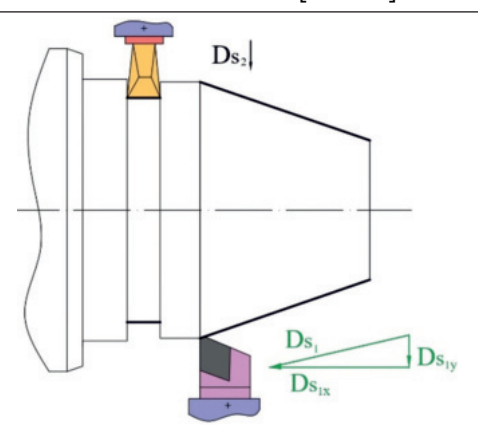
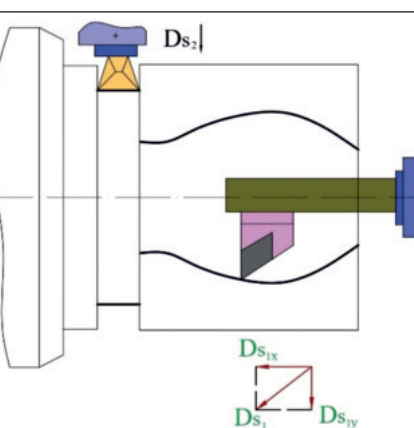
Многосуппортные наладки. Наладки этого класса могут быть осуществлены на традиционных станках с кулачковым управлением –

Примеры элементарных двухсуппортных однокоординатных наладок (деталь установлена в патроне)

Examples of elementary two-carriage one-coordinate setups (the part is mounted in the chuck)

Инструмент, установленный на поперечном суппорте	Инструмент, установленный на продольном суппорте	
	Резец для проходного точения	Резец для обработки фасок
Резец для подрезки поверхностей		
	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u1(y)] \cup \\ \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u9(-y)]$	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u2(y)] \cup \\ \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u9(-y)]$
Фасочный резец		
	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u1(y)] \cup \\ \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u2(-y)]$	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u2(y)] \cup \\ \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u2(-y)]$
Канавочный резец		
	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u1(y)] \cup \\ \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u3(-y(-x))]$	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u2(y)] \cup \\ \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u3(-y(-x))]$

Возможные и применяемые варианты двухсуппортных двухкоординатных наладок
Possible and applicable variants of two-carriage two-coordinate setups

Инструмент, установленный на поперечном суппорте	Инструмент, установленный на продольном суппорте	
	Резцы проходные токарные, использующиеся на станках с ЧПУ	Резцы токарные для расточки поверхностей на станках с ЧПУ для обработки контурных поверхностей
Резец для подрезки поверхностей		
	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u17(y)] \cup$ $\cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u9(-y)]$	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u18(y)] \cup$ $\cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u9(y)]$
Фасочный резец		
	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u17(y)] \cup$ $\cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u2(-y)]$	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u18(y)] \cup$ $\cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u2(y)]$
Канавочный резец		
	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u17(y)] \cup$ $\cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u3(-y(-x))]$	$Y0C_1 0(y)S_1(x)[u18(y)] \cup$ $\cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u3(y(-x))]$

токарно-револьверных автоматах и автоматах продольного фасонного точения. Есть возможность реализации таких наладок и на современных двухсуппортных станках с ЧПУ, если ис-

пользовать дополнительный инструментальный шпиндель с самостоятельным приводом.

В табл. 11 приведены примеры возможных и применяемых наладок этого класса.

Таблица 11

Table 11

Примеры многосуппортных наладок
Examples of multi-carriage setups

Схема наладки	Обозначение
	$Y0C_1 7(x)S_1(x)[u1(y)] \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u3(-y(-x))] \cup \\ \cup Y0C_3 2(y)S_3(y)[u5(y)]$
	$Y0C_1 7(x)S_1(x)[u7(y)] \cup Y0C_2 0(y)S_2(x)[u1(-y)] \cup \\ Y0C_3 1(y)S_3(y)[u5(y)] \cup Y0C_4 3(z)S_4(y)[u2(y)]$
	$Y0C_1 7(x)S_1(x)[u12(x) \cap u21(y)] \cup Y0C_2 2(z)S_2(y)[u5(y)] \cup \\ \cup Y0C_3 1(y)S_3(y)[u13(-y) \cap u22(-y)]$
	$Y0C_1 7(x)S_1(x)[u5(y)] \cup Y0C_2 1(y)S_2(y)[u4(-y(-x))] \cup \\ \cup Y0C_3 2(z)S_3(y)[u9(-y)]$

Выводы

1. Разработана новая многофакторная систематика многоинструментных наладок с учетом богатых технологических возможностей по организации многоинструментной обработки для современных станков с ЧПУ.

2. Проведена классификация многоинструментных наладок с выявлением применимости типов наладок и формированием классов наладок, имеющих общий механизм формирования погрешности. Обосновано создание эффективных алгоритмов управления процессом проектирования этих наладок.

3. Предлагаемая систематика многоинструментных наладок на токарных станках предназначена для создания матричной модели точности обработки. Основная особенность многоинструментной обработки заключается в силовом взаимодействии инструментов наладки. Поэтому классификация многоинструментных наладок направлена на выявление особенностей силового нагружения и деформации технологической системы при такой обработке. Это может служить основой для разработки рекомендаций по режимам резания на станках с ЧПУ.

4. Разработанная классификация многоинструментных наладок составляет основу методического обеспечения САПР токарно-автоматных операций и является базой для создания САПР токарных операций нового поколения.

Список литературы

1. Shinno H., Hashizume H. Structured method for identifying success factors in new product development of machine tools // CIRC Annals – Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 51 (1). – P. 281–284. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61517-0.
2. Moriwaki T. Multi-function machine tool // CIRC Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57 (2). – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
3. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool // CIRC Annals – Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 58 (2). – P. 588–607. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.005.
4. Design methodologies: industrial and educational applications / T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, Ch. Kind, F. Kimura // CIRC Annals – Manufacturing

Technology. – 2009. – Vol. 58 (2). – P. 543–565. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.003.

5. Shinno H., Yoshioka H., Sawano H. A framework for systematizing machine tool engineering // International Journal of Automation Technology. – 2013. – Vol. 7 (6). – P. 760–768. – DOI: 10.20965/ijat.2013.p0760.

6. Usubamatov R., Harun A., Sanuddin A. Optimisation of machining parameters by criterion of maximum productivity // International Journal of Production Research. – 2014. – Vol. 52 (10). – P. 2946–2953. – DOI: 10.1080/00207543.2013.857440.

7. Usubamatov R., Zain Z., Sin T. Optimization of multi-tool machining processes with simultaneous action // International Journal of Advanced and Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 82. – P. 1227–1239. – DOI: 10.1007/s00170-015-6920-x.

8. Levin G., Rozin B., Dolgui A. Optimization of multi-tool cutting modes in multi-item batch manufacturing system // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Vol. 46 (9). – P. 766–771. – DOI: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00357.

9. Cakir M.C., Gurarda A. Optimization of machining conditions for multi-tool milling operations // International Journal of Production Research. – 2000. – Vol. 38 (15). – P. 3537–3552. – DOI: 10.1080/002075400422789.

10. Dolgui A., Levin G., Rozin B. Optimisation of the aggregation and execution rates for intersecting operation sets: an example of machining process design // International Journal of Production Research. – 2000. – Vol. 58 (9). – P. 2658–2676. – DOI: 10.1080/00207543.2019.1629668.

11. Daoud Z., Purcheck G. Multi-tool job sequencing for tool-change reduction // International Journal of Production Research. – 1981. – Vol. 19 (4). – P. 425–435. – DOI: 10.1080/00207548108956670.

12. Torres W., Brand M., Serebrenik A. A systematic literature review of cross-domain model consistency checking by model management tools // Software and Systems Modeling. – 2021. – Vol. 20 (3). – P. 897–916. – DOI: 10.1109/SYSCON.2017.7934729.

13. Yusubov N., Abbasova H. Models for machining accuracy in multi-tool adjustment // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 17 (3). – P. 8067–8085. – DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.

14. Double tool turning: machining accuracy, cutting tool wear and chip morphology / R. Kalidasan, S. Senthilvelan, U.S. Dixit, J. Vaibhav // International Journal of Precision Technology. – 2016. – Vol. 6 (2). – P. 142. – DOI: 10.1504/IJPTech.2016.078189.

15. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces / C. Brecher, A. Eppele, S. Neues, M. Fey // International Journal of

Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Vol. 95. – P. 13–19. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.05.003.

16. Double-sided milling of thin-walled parts by dual collaborative parallel kinematic machines / R. Fu, P. Curley, C. Higgins, Z. Kilic, D. Sun, A. Murphy, Y. Jin // Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – Vol. 299. – P. 117395. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117395.

17. Asymmetrical nonlinear impedance control for dual robotic machining of thin-walled workpieces / X. Zhao, B. Tao, L. Yang, H. Ding // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 63. – P. 101889. – DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101889.

18. Yan Y., Xu J., Wiercigroch M. Stability and dynamics of parallel plunge grinding // International Journal of Advanced and Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 99. – P. 881–895. – DOI: 10.1007/s00170-018-2440-9.

19. Yamato S., Nakanishi K., Suzuki N. Development of automatic chatter suppression system in parallel milling by real-time spindle speed control with observer-based chatter monitoring // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2021. – Vol. 22. – P. 227–240. – DOI: 10.1007/s12541-021-00469-2.

20. Weck M., Staimer D. Parallel kinematic machine tools – current state and future potentials // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 51 (2). – P. 671–683. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61706-5.

21. Azvar M., Budak E. Multi-dimensional chatter stability for enhanced productivity in different parallel turning strategies // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2017. – Vol. 123. – P. 116–128. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.08.005.

22. Kanakaraju V., Hassan F., Kalidasan R. Numerical analysis of surface integrity in parallel turning. Part A: Influence of cutting tool nose radius // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38 (1). – P. 186–190. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.511.

23. Numerical analysis of surface integrity in parallel turning. Part B: Influence of cutting tool chamfer angle and chamfer width / F. Hassan, V. Kanakaraju, R. Kalidasan, G. Norkey // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 44 (1). – P. 266–270. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.464.

24. Brecher C., Trofimov Y., Bäuml S. Holistic modelling of process machine interactions in parallel milling // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 60 (1). – P. 387–390. – DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.025.

25. Yusubov N.D., Abbasova H.M., Khankishiyev I.A. Entwicklung einer projektierungstheorie für die mehrwerkzeuggestaltung mit den möglichkeiten der modernen CNC-werkzeugmaschinen // Forschung

im Ingenieurwesen. – 2021. – Vol. 85. – P. 661–678. – DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.

26. Yusubov N.D. Matrix models of the accuracy in multitool two-support setup // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29. – P. 268–271. – DOI: 10.3103/S1068798X09030125.

27. Increasing the productivity of multitool machining on automated lathes by optimizing the machining plan / S.A. Bogatenkov, N.S. Sazonova, N.D. Yusubov, P.V. Mammadov, R.I. Bazhenov // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41 (11). – P. 1071–1074. – DOI: 10.3103/S1068798X21110046.

28. Increasing the productivity of multitool machining on automated lathes by optimizing the tool positions / S.A. Bogatenkov, N.S. Sazonova, V.I. Guzeev, N.D. Yusubov, G.M. Abbasova // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41 (11). – P. 1075–1079. – DOI: 10.3103/S1068798X21110058.

29. Usher J.M., Bowden R.O. The application of genetic algorithms to operation sequencing for use in computer-aided process planning // Computers & Industrial Engineering. – 1996. – Vol. 30 (4). – P. 999–1013. – DOI: 10.1016/0360-8352(96)00048-4.

30. Indrajit M., Pradip K.R. A review of optimization techniques in metal cutting processes // Computers & Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50 (1–2). – P. 15–34. – DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.

31. Usubamatov R., Ismail K.A., Sah J.M. Mathematical models for productivity and availability of automated lines // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 66. – P. 59–69. – DOI: 10.1007/s00170-012-4305-y.

32. Ozturk E., Comak A., Budak E. Tuning of tool dynamics for increased stability of parallel (simultaneous) turning processes // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 360. – P. 17–30. – DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.009.

33. Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 6–20. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.

34. Kurt A., Sürücü S., Kirik A. Developing a mathematical model for the cutting forces prediction depending on the cutting parameters // Technology. – 2010. – Vol. 13 (1). – P. 23–30.

35. Кошин А.А. Теория точности и оптимизация многоинструментной токарной обработки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. – Челябинск, 1997. – 290 с.

36. Кошин А.А. Обработка на токарных станках: наладка, режимы резания: справочник. – Челябинск: Сити-Принт, 2012. – 744 с.

37. Кошин А.А., Юсубов Н.Д. Элементы матричной теории точности многоинструментной обработки в пространственных наладках // Вестник машиностроения. – 2013. – № 9. – С. 13–17.

38. Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М., Дадашов Р.Э. Модели сил резания при механической обработке

на современных станках токарной группы // Всероссийский форум молодых исследователей – 2023: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 30 марта 2023 г. – Петрозаводск, 2023. – С. 236–246.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 -

Metal Working and Material Science

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



Systematics of multi-tool setup on lathe group machines

Nizami Yusubov^{a, *}, Heyran Abbasova^b

Department of Machine Building, Azerbaijan Technical University, 25 H. Cavid avenue, Baku, AZ1073, Azerbaijan

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>,  nizami.yusubov@aztu.edu.az; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>,  abbasova.heyran@aztu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 July 2024

Revised: 19 August 2024

Accepted: 17 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Systematics of multi-tool setup

Lathe group machines

Classification formula for setup

Parallel multi-tool machining

Single-carriage two-coordinate setups

Two-carriage two-coordinate setups

Funding

This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation - Grant № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01.

ABSTRACT

Introduction. The analysis of factory lathe-automatic operations revealed a significant variety of multi-tool setups and identified its areas of application. To develop a matrix theory of accuracy for multi-tool machining and create a unified algorithmic approach to errors modeling for all possible spatial multi-tool setups, it is necessary to consider the flexibility of the technological system in all coordinate directions. In this regard, it is required to systematize a large number of existing multi-tool setups and classify it to structure the information and improve the understanding of its application. **Purpose of the work** is to develop a classification of multi-tool setups on multi-carriage and multi-spindle CNC lathes, enabling the creation of both a matrix model of machining accuracy for each classification class and a unified generalized matrix model of machining accuracy for the entire classification class. **The work investigates** the systematics of multi-tool setups, oriented toward the development of matrix models of machining accuracy. Therefore, the classification considered in this work is aimed at identifying the characteristics of force loading and deformation of the technological system during multi-tool machining. **The research methods** involve identifying the parameters used for classification and the hierarchy of these parameters, which determines the levels and order of the systematics. Based on the principles of systematics of multi-tool setups used in traditional automatic lathes, an analysis of its adaptation to the capabilities of modern lathes designed for multi-tool machining is conducted. **Results and discussion.** As a result of the research, a formalized six-level classification of multi-tool setups is developed, which includes the following aspects: the method of workpiece mounting, the set of carriages, the types of cutting tools, the types and directions of carriage feeds, the orientation of cutting tools relative to the workpiece, and the method of tool engagement (parallel, sequential). This classification takes into account the technological capabilities for organizing multi-tool machining on modern CNC lathes. The main classes of the proposed systematics of multi-tool setups in the presented work include single-carriage single-coordinate setups, single-carriage two-coordinate setups, dual-carriage single-coordinate setups, dual-carriage two-coordinate setups, and multi-carriage setups. The proposed systematics of multi-tool setups on lathe group machines is aimed at developing machining accuracy models and can serve as a basis for developing recommendations on cutting modes for these CNC machines. The proposed classification of multi-tool setups forms the foundation of the methodological support for the CAD system of lathe-automatic operations and serves as the basis for creating next-generation CAD systems for lathe operations.

For citation: Yusubov N.D., Abbasova H.M. Systematics of multi-tool setup on lathe group machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 92–111. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-92-111. (In Russian).

References

1. Shinno H., Hashizume H. Structured method for identifying success factors in new product development of machine tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2002, vol. 51 (1), pp. 281–284. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61517-0.
2. Moriwaki T. Multi-function machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57 (2), pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
3. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58 (2), pp. 588–607. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.005.

* Corresponding author

Yusubov Nizami D., D.Sc. (Engineering), Professor
Azerbaijan Technical University,
25 H. Javid avenue,
AZ 1073, Baku, Azerbaijan
Tel.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

4. Tomiyama T., Gu P., Jin Y., Lutters D., Kind Ch., Kimura F. Design methodologies: industrial and educational applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58 (2), pp. 543–565. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.003.
5. Shinno H., Yoshioka H., Sawano H. A frame-work for systematizing machine tool engineering. *International Journal of Automation Technology*, 2013, vol. 7 (6), pp. 760–768. DOI: 10.20965/ijat.2013.p0760.
6. Usubamatov R., Harun A., Sanuddin A. Optimisation of machining parameters by criterion of maximum productivity. *International Journal of Production Research*, 2014, vol. 52 (10), pp. 2946–2953. DOI: 10.1080/00207543.2013.857440.
7. Usubamatov R., Zain Z., Sin T. Optimization of multi-tool machining processes with simultaneous action. *International Journal of Advanced and Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1227–1239. DOI: 10.1007/s00170-015-6920-x.
8. Levin G., Rozin B., Dolgui A. Optimization of multi-tool cutting modes in multi-item batch manufacturing system. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol. 46 (9), pp. 766–771. DOI: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00357.
9. Cakir M.C., Gurarda A. Optimization of machining conditions for multi-tool milling operations. *International Journal of Production Research*, 2000, vol. 38 (15), pp. 3537–3552. DOI: 10.1080/002075400422789.
10. Dolgui A., Levin G., Rozin B. Optimisation of the aggregation and execution rates for intersecting operation sets: an example of machining process design. *International Journal of Production Research*, 2000, vol. 38 (9), pp. 2658–2676. DOI: 10.1080/00207543.2019.1629668.
11. Daoud Z., Purcheck G. Multi-tool job sequencing for tool-change reduction. *International Journal of Production Research*, 1981, vol. 19 (4), pp. 425–435. DOI: 10.1080/00207548108956670.
12. Torres W., Brand M., Serebrenik A. A systematic literature review of cross-domain model consistency checking by model management tools. *Software and Systems Modeling*, 2021, vol. 20 (3), pp. 897–916. DOI: 10.1109/SYSCON.2017.7934729.
13. Yusubov N., Abbasova H. Models for machining accuracy in multi-tool adjustment. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 17 (3), pp. 8067–8085. DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.
14. Kalidasan R., Senthilvelan S., Dixit U.S., Vaibhav J. Double tool turning: machining accuracy, cutting tool wear and chip morphology. *International Journal of Precision Technology*, 2016, vol. 6 (2), p. 142. DOI: 10.1504/IJPTech.2016.078189.
15. Brecher C., Epple A., Neues S., Fey M. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 95, pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.05.003.
16. Fu R., Curley P., Higgins C., Kilic Z., Sun D., Murphy A., Jin Y. Double-sided milling of thin-walled parts by dual collaborative parallel kinematic machines. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, vol. 299, p. 117395. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117395.
17. Zhao X., Tao B., Yang L., Ding H. Asymmetrical nonlinear impedance control for dual robotic machining of thin-walled workpieces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 63, p. 101889. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101889.
18. Yan Y., Xu J., Wiercigroch M. Stability and dynamics of parallel plunge grinding. *International Journal of Advanced and Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, pp. 881–895. DOI: 10.1007/s00170-018-2440-9.
19. Yamato S., Nakanishi K., Suzuki N. Development of automatic chatter suppression system in parallel milling by real-time spindle speed control with observer-based chatter monitoring. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, vol. 22, pp. 227–240. DOI: 10.1007/s12541-021-00469-2.
20. Weck M., Staimer D. Parallel kinematic machine tools – current state and future potentials. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2002, vol. 51 (2), pp. 671–683. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61706-5.
21. Azvar M., Budak E. Multi-dimensional chatter stability for enhanced productivity in different parallel turning strategies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 123, pp. 116–128. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.08.005.
22. Kanakaraju V., Hassan F., Kalidasan R. Numerical analysis of surface integrity in parallel turning. Part A: Influence of cutting tool nose radius. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38 (1), pp. 186–190. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.511.
23. Hassan F., Kanakaraju V., Kalidasan R., Norkey G. Numerical analysis of surface integrity in parallel turning. Part B: Influence of cutting tool chamfer angle and chamfer width. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44 (1), pp. 266–270. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.464.
24. Brecher C., Trofimov Y., Bäuml S. Holistic modelling of process machine interactions in parallel milling. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60 (1), pp. 387–390. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.025.



25. Yusubov N.D., Abbasova H.M., Khankishiyev İ.A. Entwicklung einer projektierungstheorie für die mehrwerkzeugbearbeitung mit den möglichkeiten der modernen CNC-werkzeugmaschinen. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2021, vol. 85, pp. 661–678. DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.
26. Yusubov N.D. Matrix models of the accuracy in multitool two-support setup. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, pp. 268–271. DOI: 10.3103/S1068798X09030125.
27. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D., Mammadov P.V., Bazhenov R.I. Increasing the productivity of multitool machining on automated lathes by optimizing the machining plan. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41 (11), pp. 1071–1074. DOI: 10.3103/S1068798X21110046.
28. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Guzeev V.I., Yusubov N.D., Abbasova G.M. Increasing the productivity of multitool machining on automated lathes by optimizing the tool positions. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41 (11), pp. 1075–1079. DOI: 10.3103/S1068798X21110058.
29. Usher J.M., Bowden R.O. The application of genetic algorithms to operation sequencing for use in computer-aided process planning. *Computers & Industrial Engineering*, 1996, vol. 30 (4), pp. 999–1013. DOI: 10.1016/0360-8352(96)00048-4.
30. Indrajit M., Pradip K.R. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering*, 2006, vol. 50 (1–2), pp. 15–34. DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
31. Usubamatov R., Ismail K.A., Sah J.M. Mathematical models for productivity and availability of automated lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 59–69. DOI: 10.1007/s00170-012-4305-y.
32. Ozturk E., Comak A., Budak E. Tuning of tool dynamics for increased stability of parallel (simultaneous) turning processes. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 360, pp. 17–30. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.009.
33. Yusubov N., Abbasova H. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23 (4), pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.
34. Kurt A., Sürücüler S., Kirik A. Developing a mathematical model for the cutting forces prediction depending on the cutting parameters. *Technology*, 2010, vol. 13 (1), pp. 23–30.
35. Koshin A.A. *Teoriya tochnosti i optimizatsiya mnogoinstrumentnoi tokarnoi obrabotki*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Accuracy theory and optimization of multi-tool turning. Dr. eng. sci. diss.]. Chelyabinsk, 1997. 290 p. (In Russian).
36. Koshin A.A. *Obrabotka na tokarnykh stankakh: naladka, rezhimy rezaniya* [Processing on lathes: adjustment, cutting conditions]. Handbook. Chelyabinsk, Siti-Print Publ., 2012. 744 p.
37. Koshin A.A., Yusubov N.D. Elementy matrichnoi teorii tochnosti mnogoinstrumentnoi obrabotki v prostanstvennykh naladkakh [Elements of matrix theory of multitool processing accuracy in three-dimensional setups]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2013, no. 9, pp. 13–17. (In Russian).
38. Yusubov N.D., Abbasova Kh.M., Dadashov R.E. [Models of cutting forces during mechanical machining on modern machines of turning group]. *Vserossiiskii forum molodykh issledovatelei – 2023* [All-Russian forum of young researchers – 2023]. Petrozavodsk, 2023, pp. 236–246. (In Russian).

Conflicts of Interest

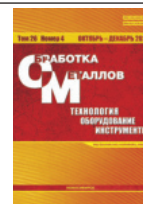
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Повышение стойкости зубьев буровых долот за счет изменения технологии их изготовления

Джавохир Тошов^{1,а}, Дониёр Фозилов^{2,б}, Касым Елемесов^{3,с}, Улугбек Рузиев^{2,д},
Довуджон Абдуллаев^{2,е}, Динара Басканбаева^{3,ф,*}, Лала Бекирова^{4,г}

¹ Ташкентский государственный технический университет, ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 100095, Республика Узбекистан

² АО «Научно-производственное объединение «Алмалыкский ГМК», ул. В. Гайдара, 1, г. Чирчик, 111700, Республика Узбекистан

³ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан

⁴ Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, пр. Азатлыг, 34, г. Баку, AZ1010, Азербайджан

^а <https://orcid.org/0000-0003-4278-1557>, j.toshov@tdtu.uz; ^б <https://orcid.org/0009-0005-6362-8326>, fozilovdoniyor81@gmail.com;

^с <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>, k.yelemessov@satbayev.university; ^д <https://orcid.org/0009-0008-2371-3085>, u.ruziev@agmk.uz;

^е <https://orcid.org/0009-0005-6362-8326>, dn.abdullaev@agmk.uz; ^ф <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>, d.baskanbayeva@satbayev.university;

^г <https://orcid.org/0000-0003-0584-7916>, lala.bakirova@asoiu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

История статьи:

Поступила: 22 августа 2024

Рецензирование: 10 сентября 2024

Принята к печати: 17 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Буровые долота
Вольфрамокобальтовые сплавы
Производство
Штыревое долото
Твердые породы
Эксплуатационные испытания

Финансирование

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, номер гранта IRN BR18574141.

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие горной промышленности требует повышения стойкости и долговечности инструмента. Для долот горно-бурильных машин эта задача часто решается путем улучшения материала зубьев долот. В работе представлены результаты исследования по разработке технологии изготовления твердосплавных буровых коронок с повышенной износостойкостью и испытания опытных образцов при бурении твердых горных пород. **Методы и материалы.** В работе исследовались твердосплавные зубья долот, изготавливаемые АО «Алмалыкский ГМК» по стандартной и доработанной технологии. Были изучены их строение и химический состав. Изменение технологии подразумевало изменение формы зуба. В качестве исходного компонента также использовался более чистый порошок вольфрама. **Результаты и обсуждение.** Разработаны и освоены новые способы выполнения технологических операций по изготовлению твердосплавных зубьев (штифтов) и стальных штифтовых долот. При изготовлении вольфрамокобальтовых зубьев использовался твердый сплав ВК10КС, для производства которого применялся порошок карбида вольфрама, синтезированный карбидизацией очищенного порошка вольфрама. Форма поверхности зубьев была изменена с баллистической на полубаллистическую. В качестве связующего использовался металлический порошок кобальта. Штифтовые долота типа КНШ 40×25 изготовлены из стали 35ХГС. Испытания экспериментальных долот проводились на нескольких рудниках, в результате чего была установлена их пригодность для бурения пород с твердостью $f = 14 \dots 18$. Результаты промышленной эксплуатации показали, что стойкость зубьев долот, изготовленных АО «Алмалыкский ГМК», незначительно уступает долотам европейских производителей. При этом стоимость таких долот в разы ниже.

Для цитирования: Повышение стойкости зубьев буровых долот за счет изменения технологии их изготовления / Дж.Б. Тошов, Д.М. Фозилов, К.К. Елемесов, У.Н. Рузиев, Д.Н. Абдуллаев, Д.Д. Басканбаева, Л.Р. Бекирова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 112–124. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-112-124.

Введение

Горная промышленность Средней Азии активно развивается благодаря наличию богатых природных ресурсов. Государства Средней Азии, включая Узбекистан, Казахстан, Таджикистан, Кыргызстан и Туркменистан, активно развивают горнодобывающую промышленность, стремясь увеличить объемы производства и при-

*Адрес для переписки

Басканбаева Динара Джумабаевна, к.т.н.

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,

ул. Сатпаева, 22,

050013, г. Алматы, Республика Казахстан

Тел.: +7 701 861 5162, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university

влекать иностранные инвестиции [1]. Одним из ключевых направлений развития горной промышленности является добыча и переработка редкоземельных металлов. Редкоземельные металлы играют важную роль в производстве высокотехнологичной продукции, такой как электроника, аккумуляторы и оборудование для возобновляемой энергетики [2–5]. Повышение объемов добычи полезных ископаемых требует активного совершенствования как оборудования и машин, так и инструмента для добычи.

Вращательно-ударное бурение – это комбинированный вид бурения, сочетающий резание горных пород с приложением ударных нагрузок. При таком бурении на породорезущий инструмент воздействует крутящий момент, статическая сила подачи и удары определенной частоты и силы. В некоторых геологических условиях ударно-вращательное бурение оказывается более производительным, чем вращательное и ударное по отдельности. Это объясняет его широкое применение в различных горных работах [6, 7].

Эффективное разрушение породы при ударно-вращательном бурении твердосплавными долотами осуществляется за счет оптимального подбора состава твердого сплава, размера инструмента, геометрии резцов, их расположения по торцу долота, хорошо организованной системы промывки и правильно рассчитанных параметров режима бурения [8–10].

В штифтовых сверлах в качестве материала для режущих зубьев используются твердые сплавы – как правило, вольфрамокобальтовые сплавы ВК6 и ВК8. Эти твердосплавные материалы зарекомендовали себя как надежные в использовании и относительно недорогие. Долота указанного типа могут работать в породах до девятой категории буримости [11].

Износостойкость долот в эксплуатации зависит от геолого-технических условий бурения: твердости, абразивности, трещиноватости, прерывистости пород; скорости вращения, диаметра коронки и осевой нагрузки; глубины и кривизны скважины; исправности бурового станка [12–15]. Однако решающее значение имеют твердость и прочность при изгибе твердосплавных резцов, а также качество изготовления и сборки штыревого долота.

Существенная доля такого инструмента производится в странах Европы и имеет высокую стоимость. В рамках предприятия АО «Алмалыкский ГМК» (Узбекистан) производятся породоразрушающие долота по существенно меньшей себестоимости. При этом стойкость и долговечность таких долот ниже, чем у европейских аналогов.

Цель данной работы: повышение стойкости зубьев буровых долот за счет совершенствования технологии их изготовления.

Методы и материалы исследований

Работа выполнялась в три этапа. На первом этапе был проведен анализ причин разрушения долот, изготавливаемых АО «Алмалыкский ГМК». На втором этапе на основании полученных результатов была изменена технология изготовления зубьев долот и исследованы полученные по новой технологии образцы. На третьем этапе были проведены сравнительные испытания образцов долот, изготовленных по усовершенствованной технологии, и их европейских аналогов фирмы Atlas Corco (Швеция).

Исследовательская работа выполнялась на базе научно-производственного объединения по производству редких металлов и твердых сплавов АО «Алмалыкский ГМК» (НПО АГМК). Проведены исследования по разработке технологии изготовления сверл типа КНШ 40×25 мм с семью вставными штифтами-зубьями, аналогичных сверлам производства Atlas Corco (Швеция). Прототипы долот были изготовлены с использованием твердосплавных зубьев из вольфрамокобальтовых сплавов. Производство зубьев осуществлялось на НПО АГМК.

Структурные исследования проводились с использованием светового микроскопа Carl Zeiss AxioObserver Z1m и сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP (Йена, Германия). Фазовый состав изучался с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США) в излучении $\text{CuK}\alpha$. Для металлографического анализа поверхности зубьев долот использовался визуально-оптический метод с использованием микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m.

Результаты и их обсуждение

Определение причин разрушения зубьев долот, изготовленных по стандартной технологии

Опытно-эксплуатационные испытания пер-
вых образцов шарошечных долот КНШ 40×25 мм
характеризовались их низкой износостойкостью
при проходке по сравнению с импортными об-
разцами производства Atlas Copco (Швеция).
На рис. 1, а показан образец коронки КНШ
40×25 мм после испытания по пробиванию гра-
нита на глубину сверления 18 см. На рис. 1, б
приведено увеличенное изображение пористой
поверхности зуба с углублениями, образующи-
ми так называемую поверхность «кожи реп-
тилии».

На рис. 2 представлено увеличенное изобра-
жение участка поверхности на границе участка
износа зуба с поверхностью зуба до износа, на
котором видно, что вдоль границы происходит
разделение целых скоплений зерен твердого
сплава ВК в результате износа.

Поверхность типа «кожа рептилии» характе-
ризуется возникновением максимальных растя-



Рис. 1. Семишарошечное долото типа КНШ 40×25
производства НПО после эксплуатационных ис-
пытаний при бурении гранитной породы, глубина
бурения 18 см (а); состояние поверхностей зубьев
коронки, характеризующееся пористостью с углуб-
лениями, известными как образование поверхности
«кожи рептилии» (б)

Fig. 1. Seven-cone drill bit type KNSh40×25 manu-
factured by NPO, after operational tests during drill-
ing of granite rock; drilling depth 18 cm (a); the condition
of the surfaces of the teeth of the crown, character-
ized by porosity with depressions known as the forma-
tion of the “reptile skin” surface (b)



Рис. 2. Сечение границы поверхности участка износа
зуба с поверхностью зуба до износа: слева – исход-
ная поверхность; справа – поверхность в резуль-
тате износа

Fig. 2. Cross-section of the boundary of the surface of
the tooth wear area with the tooth surface before wear:
left – original surface; right – surface as a result of
wear

гивающих напряжений в отдельных точках кон-
такта с шероховатостью породы.

На рис. 3 показан схематический пример,
объясняющий механизм образования трещин
на поверхности зуба. Согласно источнику, вы-
ступающая часть породы вдавливается в по-
верхность зуба, создавая локальное напряже-
ние на его поверхности. Когда эта процедура
повторяется несколько раз, мелкие трещины
соединяются, образуя в итоге структуру «кожи
рептилии».

Для установления причин низкой износос-
тойкости экспериментальных долот НПО
АГМК были проведены исследования, направ-
ленные на разработку оптимальных способов
изготовления вольфрамокобальтовых зубьев,
их прочного закрепления в канавках долот
и совершенствование технологии их сборки.
Согласно сведениям из литературы [16, 17]
отделение материалов с поверхностями твердо-
сплавных зубьев может происходить несколь-
кими способами:

- измельчение зерен твердого сплава ВК
и отделение фрагментов;
- отделение цельных зерен или их частей,
которые теряют способность удерживаться
в структуре;
- измельчение смеси: ВК-сплав / каменное
связующее и отделение фрагментов;

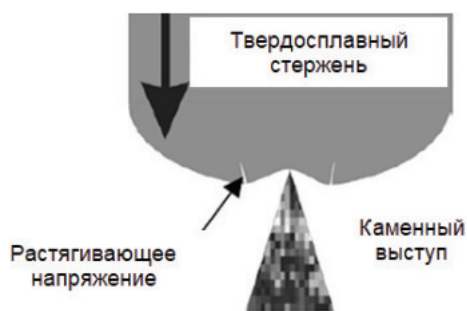


Рис. 3. Механизм формирования «кожи рептилии»

Fig. 3. The mechanism of formation of "reptile skin"

- трибохимический износ, соскабливание корродированных или окисленных поверхностных слоев ВК;

- отделение фрагментов композиционных фрагментов групп зерен ВК вместе со связующим.

Исследование микроструктуры образцов вольфрамокобальтовых зубьев первых опытных партий показало, что одной из причин образования пористой структуры с впадинами, склонной к образованию ям, трещин и сколов при воздействии на зубья шероховатостей горных пород, является большой размер зерен карбида вольфрама. Большой размер зерен вольфрама получается в результате использования обычного металлического вольфрамового порошка, в составе которого имеются нежелательные примеси кальция, кремния, железа и серы.

На рис. 4 представлена микроструктура обычного образца твердого сплава ВК10, элементный состав которого выявил значительное содержание примесей, негативно влияющих на физико-механические свойства сплава (рис. 5).

На рис. 6 представлена микроструктура поверхности спая образца обычного твердого сплава ВК10. Видно, что твердый сплав отличается наличием в нем областей неоднородности в виде скоплений выделившихся крупных сферических образований, а также явно инородных частиц, обнажившихся на поверхности излома образца ВК10 (рис. 7). Это объясняет причину излома.

Области неоднородности и наличие зерен посторонних примесей негативно влияют на прочность при изгибе, твердость, ударную вязкость и другие физико-механические свойства сплава ВК10, которые в конечном итоге должны определять эксплуатационную износостойкость изготовленных твердосплавных зубьев.

Электронное изображение 8

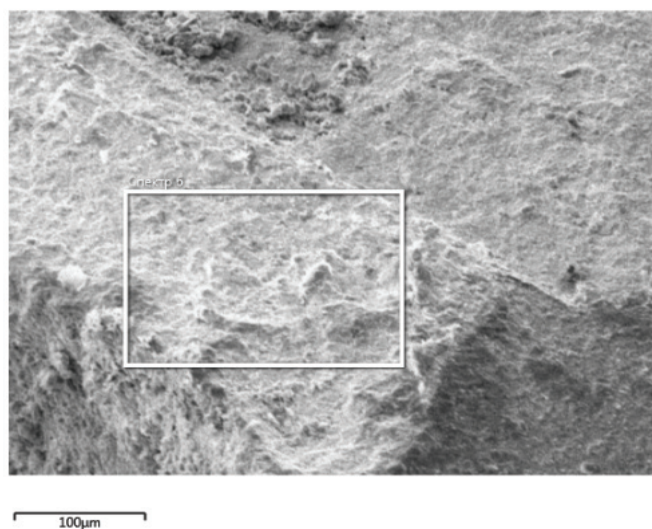


Рис. 4. Морфологические особенности микроструктуры обычного образца твердого сплава ВК10

Fig. 4. Morphological features of the microstructure of a conventional sample of hard alloy ВК10 (90 % W; 10 % Co)

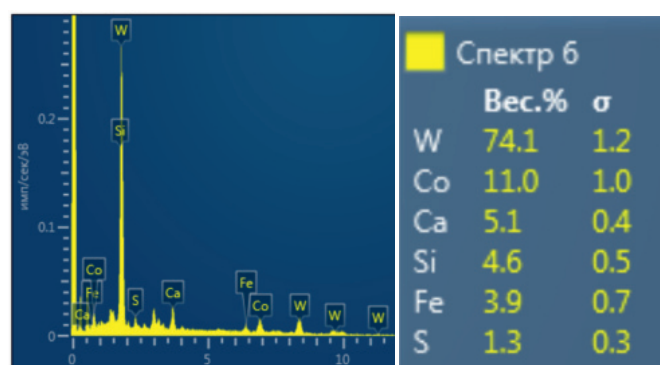


Рис. 5. Результаты элементного анализа участка микроструктуры образца обычного твердого сплава ВК10

Fig. 5. Results of elemental analysis of a section of the microstructure of a sample of conventional hard alloy ВК10 (90 % W; 10 % Co)

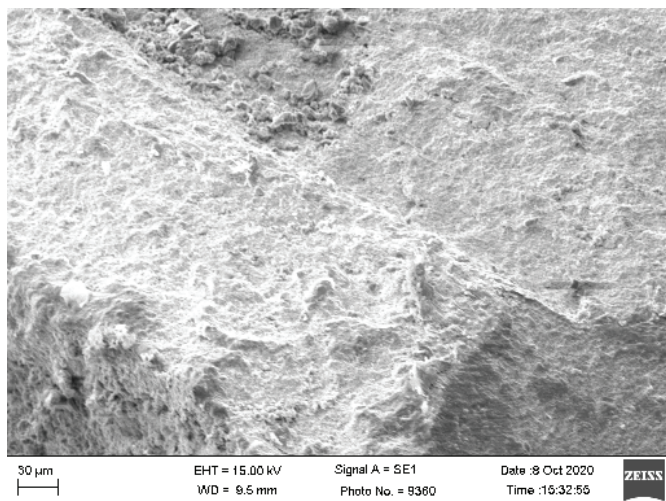


Рис. 6. Поверхность раскалывания образца обычного твердого сплава BK10

Fig. 6. Cleavage surface of a sample of conventional hard alloy VK10 (90 % W; 10 % Co)

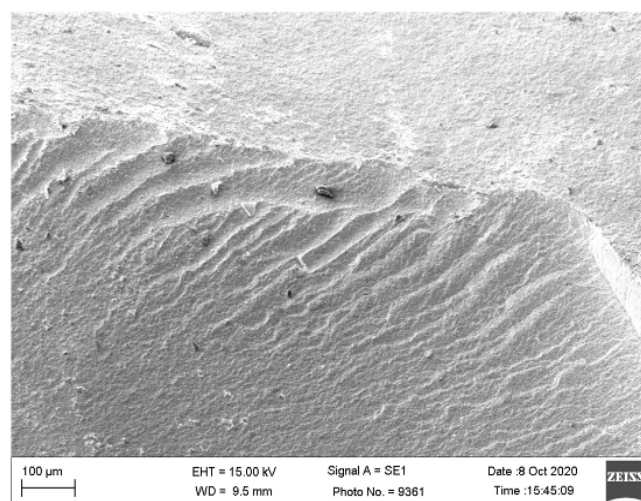


Рис. 7. Поверхность разрушения образца обычного твердого сплава BK10

Fig. 7. Fracture surface of a sample of conventional hard alloy VK10 (90 % W; 10 % Co)

Совершенствование технологии производства зубьев долот

С целью достижения высокой чистоты и однородности сплава BK10 для зубьев буровых долот были разработаны и опробованы технологические параметры получения высокочистого металлического порошка вольфрама. Для этого

была разработана технология получения исходного триоксида вольфрама повышенной чистоты. Описание технологии приведено в более ранних работах авторов [18, 19]. На рис. 8 представлена микрофотография порошка триоксида вольфрама, состоящего из однородных призматических кристаллов. Элементный состав ха-

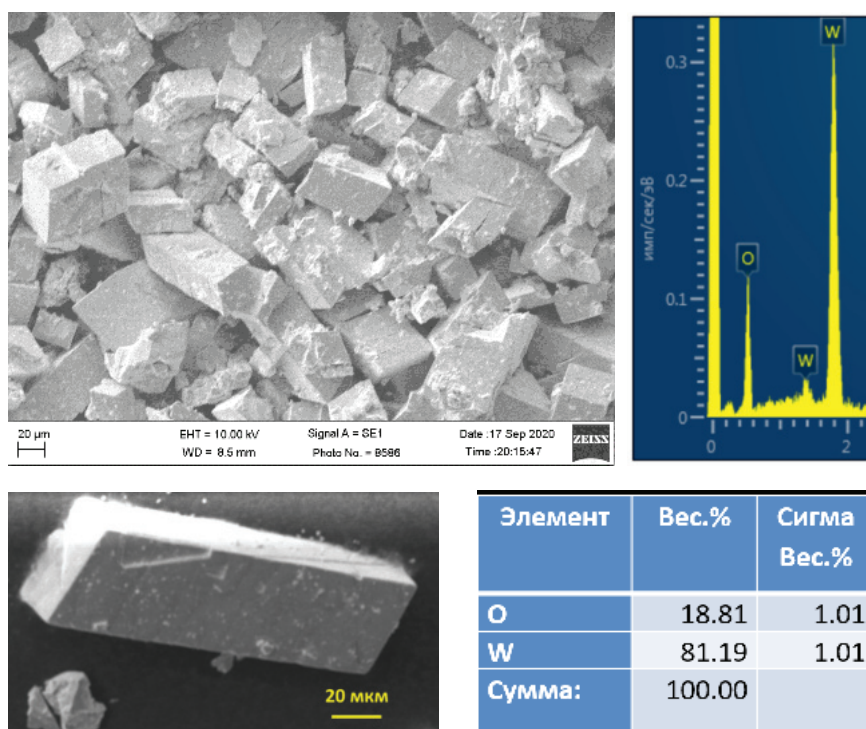


Рис. 8. Порошковые кристаллы триоксида вольфрама; результаты элементного анализа порошка триоксида вольфрама

Fig. 8. Tungsten trioxide powder crystals; results of elemental analysis of tungsten trioxide powder

рактируется наличием вольфрама и кислорода. Соотношение этих элементов соответствует стехиометрии триоксида.

На рис. 9 показана микрофотография кристаллов металлического порошка вольфрама, полученного из чистого триоксида вольфрама, а также представлены результаты элементного анализа кристаллов полученного металлического порошка вольфрама.

На рис. 10 представлены результаты элементного анализа образца синтезированного по-

рошка чистого металлического вольфрама, подтверждающие его высокую степень чистоты.

Порошок чистого металлического вольфрама использовался для получения карбида вольфрама методом карбидизации с использованием графитового порошка по технологии НПО АГМК. Использовался порошок чистого металлического вольфрама с содержанием W более 99,80 %, т. е. соответствующий марке КС. Восстановление проводилось по режиму получения порошка его карбида со средним размером зерна Фишера 12,0...20,0 мкм. Процесс получения твердого сплава заключался в измельчении смеси порошков металлического вольфрама и графита в мельнице со спиртом, выпаривании пульпы, просеивании, смешивании с пластификатором, прессовании зубьев, сушке и водородном спекании.

Для прессования зубьев были изготовлены специальные твердосплавные пуансоны из сплава ВК20, чтобы увеличить давление прессования для достижения их высокой плотности, однородности, прочности и износостойкости.

На этапе прессования зубьев был решен ряд вопросов, направленных на устранение тенденции к образованию трещин прессования, которые возникают из-за повышенной дисперсности пресс-порошка [20]. Характерные трещины образовывались перпендикулярно вектору пресс-

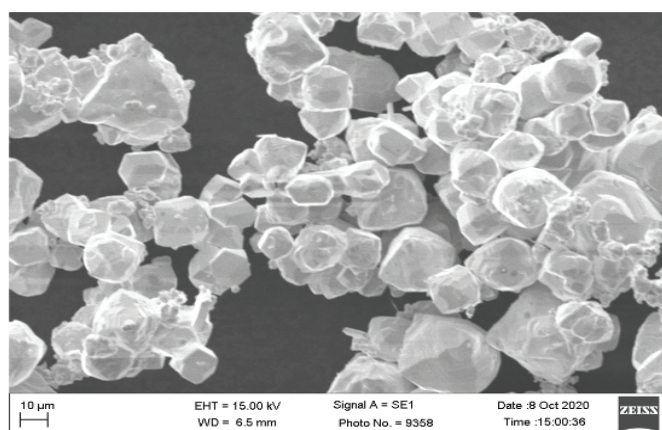


Рис. 9. Микрофотография чистого металлического порошка вольфрама, полученного из чистого триоксида вольфрама

Fig. 9. Micrograph of pure tungsten metal powder obtained from pure tungsten trioxide

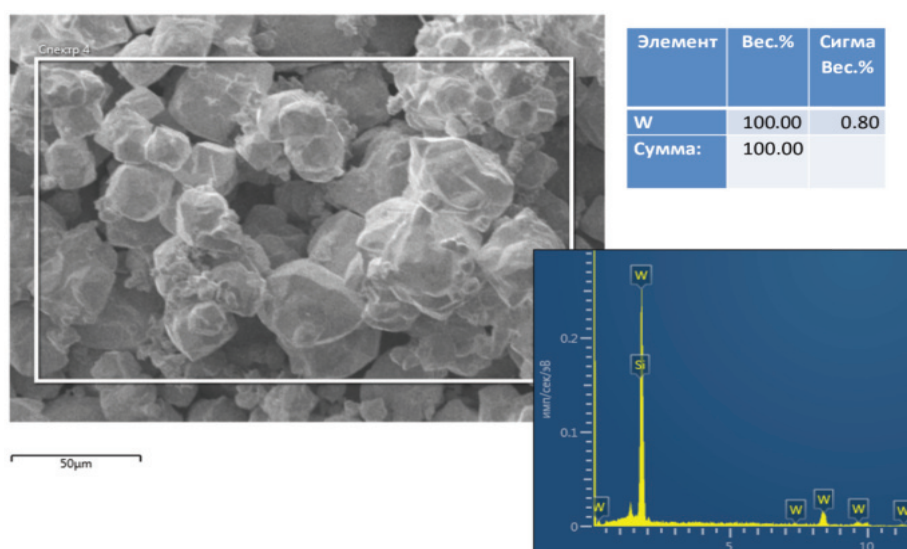


Рис. 10. Результаты элементного анализа синтезированного образца чистого металлического порошка вольфрама

Fig. 10. Results of elemental analysis of the synthesized sample of pure tungsten metal powder

сования за счет расслаивания пресс-порошка вследствие возникновения так называемого эффекта пружины, связанного с возникновением градиента давления. На рис. 11 показаны трещины расслаивания, возникающие при прессовании зубьев из высокодисперсных пресс-порошков.

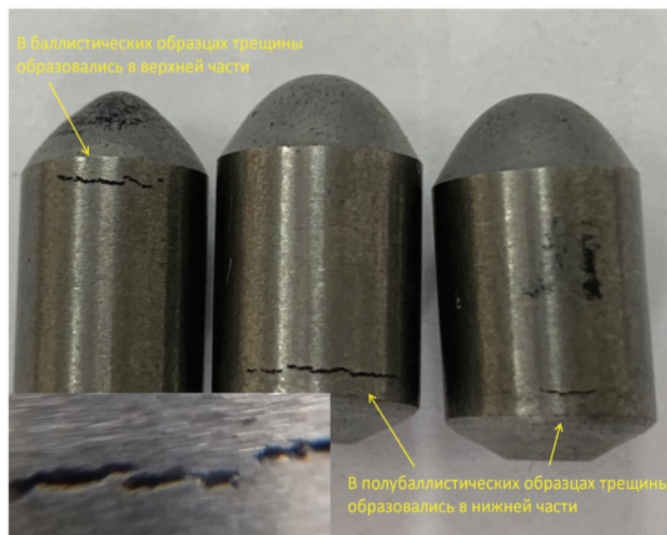


Рис. 11. Области локализации трещин расслоения в твердом сплаве. Зубья баллистической и полубаллистической формы

Fig. 11. Areas of localization of delamination cracks in hard alloy. Ballistic and semi-ballistic teeth

При нагружении верхней рабочей поверхности баллистического зуба верхним пуансоном на боковой цилиндрической поверхности, расположенной вблизи верхней сферической поверхности, был обнаружен горизонтальный кольцевой слой компакта. Было также обнаружено, что поверхность зубьев, сформированная в контакте с верхним пуансоном, характеризуется образованием пористой структуры с углублениями, т. е. с образованием «кожи рептилии».

Для исключения появления трещин расслоения в области верхней рабочей части зуба, где требуется наибольшая прочность и износостойкость, а также для исключения образования «кожи рептилии» форма зуба была изменена с баллистической на полубаллистическую [21, 22]. В результате изменения формы, ранее подвергавшейся указанным дефектам прессования, верхняя поверхность зуба вступала в контакт с нижним пуансоном. В этом случае верхний пуансон с измененной формой поверхности формировал нижнюю часть зуба.

На рис. 11 показаны образцы штампованных полуфабрикатов зубьев баллистической и полубаллистической формы. Последующие эксплуатационные испытания подтвердили правильность изменения формы зубьев на полубаллистическую.

На рис. 12 и 13 показано состояние поверхностей торцов зубьев при их изготовлении в баллистической и полубаллистической форме.

Были проведены испытания физико-химических параметров образцов твердосплавных зубьев, спеченных в водородной печи при различных режимах [23, 24]. Результаты испытаний показали соответствие получен-

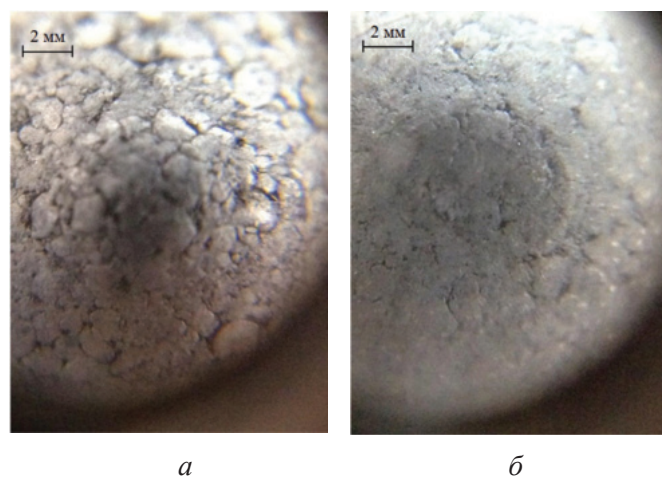


Рис. 12. Рабочие поверхности зубьев баллистической (а) и полубаллистической (б) формы

Fig. 12. Working surfaces of teeth of ballistic (a) and semi-ballistic (b) shapes

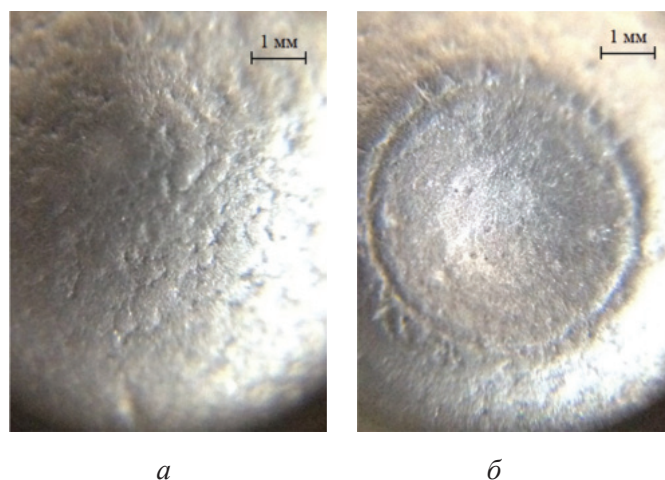


Рис. 13. Образец рабочей (а) и обратной (б) поверхности полубаллистического твердосплавного зуба

Fig. 13. Sample of working (a) and reverse (b) surfaces of a semi-ballistic carbide tooth

ных образцов зубьев нормативным требованиям, предъявляемым к сплаву ВК10КС (см. таблицу).

При сравнении с параметрами долот производства фирмы Atlas Corco (Швеция) твердость и размеры зерен отличаются не более чем на 2,5 %. Твердость зубьев на инструменте от Atlas

Corco составляет HRA 88,3. Это почти совпадает с твердостью зубьев, полученных по разработанной технологии. Практически не отличается и средний размер зерна: для зубьев от Atlas Corco он составляет 4,1 мкм, что тоже близко к размеру зерна зубьев, полученных по разработанной технологии.

Результаты сравнительных испытаний физико-химических свойств твердосплавных зубьев, спеченных по различным режимам

Results of comparative tests of physical and chemical properties of carbide teeth sintered under different conditions

Анализируемые параметры	Свойства зубьев, спеченных по способу 1	Свойства зубьев, спеченных по способу 2	Технические требования к сплаву ВК10
Плотность, г/см ³	14,55	14,51	14,43...14,63
Твердость, HRA	87,8	87,8	87,4...88,2
Коэрцетивная сила, Э	87	80	70...90
Средний размер зерна, мкм	4,3	4,2	Не регулируется
Микроструктура	Равноосная зернистая структура	Равноосная зернистая структура	Однородная, без крупных зерен и скоплений кобальта
C_{total} , %	5,40	5,52	5,46...5,54

Сравнительные испытания долот, изготовленных по различным технологиям

Для изготовления стальных корпусов коронок была разработана 3D-модель штифтовой коронки и программа для ее изготовления на пятикоординатном станке с ЧПУ SNKexl 80. Экспериментальные коронки изготавливались из стали 35ХГС с последующей закалкой и шлифовкой до чистоты Ra 1,6.

Окончательная сборка долот КНШ 40×25 осуществлялась методом холодной прессовки зубьев, заточенных под угол конуса зуба 39°. Для производственных испытаний были изготовлены опытно-промышленные партии долот КНШ 40×25, которые прошли эксплуатационные испытания на нескольких шахтах.

Несколько партий экспериментальных долот КНШ 40×25 были испытаны на Кызыл-Ольминских рудниках Ангренского рудоуправления при бурении породы с твердостью $f' = 14...15$ с результатом бурения 48,2 метра, а также для породы с $f' = 12...16$ с результатом 46,3 метра, при износе 10–15 %.

Долота также были испытаны при бурении пород с $f' = 14...17$ в условиях рудника «Каулды» со средним результатом по четырем проходкам

49,5 метра. Были также проведены испытания 15 долот КНШ 40×25 на руднике «Чадак» в штольнях с прочностью пород $f' = 16...18$, результаты бурения составили от 47 до 58 метров.

Получены акты производственных испытаний на пригодность буровых долот КНШ 40×25, изготовленных на НПП, для работы на рудниках «Ангренс», «Каулди» и «Чадак».

Выполненные работы по промышленной эксплуатации экспериментальных долот показали, что их стойкость уступает долотам, изготовленным Atlas Corco (Швеция), не более чем на 14–17 %.

При освоении производства твердосплавных штифтовых долот КНШ 40×25 на АО «Научно-производственное объединение “Алмалыкский ГМК”» ожидается получение значительного годового экономического эффекта за счет их более низкой стоимости в сравнении с долотами производства фирмы Atlas Corco (Швеция).

Заключение

По результатам проведенных исследований были выявлены основные причины быстрого выхода из строя зубьев долот, производимых

НПО АГМК. Исследования показали, что основная причина их разрушения – это плохая структура (крупное зерно и наличие микродефектов). Существенно снижает стойкость также и неудачная форма поверхности зубьев.

Проведенные работы по оптимизации технологии изготовления зубьев долот позволили существенно повысить их стойкость. Для изготовления использовался более чистый порошок вольфрама более низкой дисперсности, была оптимизирована форма поверхности зуба на полубаллистическую. Внесены изменения в режим спекания и последующей выдержки зубьев. В итоге была разработана усовершенствованная технология производства зубьев из твердого сплава ВК10КС. Зубья, изготовленные по разработанной технологии, показали сопоставимую стойкость с зубьями, изготовленными европейским производителем (Atlas Copco, Швеция). При этом стоимость долот с зубьями, изготовленными по технологии НПО АГМК, существенно ниже.

Список литературы

1. Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 142–150. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150.
2. Логический подход к построению модели машинного обучения для оценки устойчивого развития горных территорий / С.В. Галачиева, С.А. Махосева, Л.А. Лютикова, А.М. Тлеухов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 921–928. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-921-928.
3. Ключев Р.В. Системный анализ методов расчета систем электроснабжения карьеров // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 302–310. – DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.
4. Simulation analysis of rock braking mechanism of tunnel boring machine / L. Zhu, T. Wei, B. Liu, T. Yu // Technical Gazette. – 2016. – Vol. 23 (6). – P. 1585–1590. – DOI: 10.17559/TV-20141107084349.
5. The resource efficiency assessment technique for the foundry production / I.G. Vidayev, N.V. Martyushev, A.S. Ivashutenko, A.M. Bogdan // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 141–145. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.

6. Research on slim-hole drilling technology for shale gas geological survey in China / H. Zhao, H. Wu, L. Shen, Zh. Zhu, Y. Shan // Petroleum Research. – 2024. – Vol. 9 (3). – P. 451–461. – DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.03.006.

7. Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys / A. Zykova, N. Martyushev, V. Skeebe, D. Zadkov, A. Kuzkin // Materials. – 2019. – Vol. 12 (6). – P. 981. – DOI: 10.3390/ma12060981.

8. Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes / T. Stoxreiter, A. Martin, D. Teza, R. Galler // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – Vol. 108. – P. 179–188. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.06.007.

9. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 912–916. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

10. Balci C., Bilgin N. Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – Vol. 44 (3). – P. 468–476. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.001.

11. Zverev E.A., Skeebe V.Yu. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 132–137. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

12. Niu Z., Jiao F., Cheng K. An innovative investigation on chip formation mechanisms in micro-milling using natural diamond and tungsten carbide tools // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 31 (1). – P. 382–394. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.11.023.

13. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, N.V. Martyushev, N.V. Vakhrushev, A.K. Zhigulev // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

14. Self-rotatory performance of conical cutter interacted with rock material / X. Liu, P. Tang, X. Li, M. Tian // Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 80. – P. 197–209. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.06.030.

15. Efficiency of well drilling with air blowing based on the use of a vortex tube / J.B. Toshov, K.T. Sherov, B.N. Absadykov, R.U. Djuraev, M.R. Sikhimbayev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2023. – Vol. 4 (460). – P. 225–235. – DOI: 10.32014/2023.2518-170X.331.

16. Теплякова А.В., Жуков И.А., Мартюшев Н.В. Применение бурильных машин с ударным кулачковым механизмом в различных горно-геологических условиях // Устойчивое развитие горных

территорий. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 501–511. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-501-511.

17. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16.

18. Toshov J.B. The questions of the dynamics of drilling bit on the surface of well bottom // Archives of Mining Sciences. – 2016. – Vol. 61 (2). – P. 275–283. – DOI: 10.1515/amsc-2016-0020.

19. Analysis of interaction of rock breaking tool with rock in the drilling process / J.B. Toshov, K.T. Sherov, M.R. Sikhimbayev, B.N. Absadykov, A. Esirkepov // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2024. – Vol. 1 (463). – P. 271–281. – DOI: 10.32014/2024.2518-170X.380.

20. Башлык С.М., Загибайло Г.Т. Бурение скважин. – М.: Недра, 1983. – 447 с.

21. Kinematic features of a new drill bit of the tornado-like bottom-hole model / J. Tian, X. Pang, Z. Liang, L. Yang, L. Zhang, Q. Wei, Y. Li, Y. Zhu // Acta Petrolei Sinica. – 2013. – Vol. 34 (6). – P. 1163–1167.

22. Мендебаев Т.Н., Смашов Н.Ж. Многокамерная забойная гидромашинка роторного типа для бурения скважин // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 303–309. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-303-309.

23. Породорежущий инструмент для геологоразведочных скважин: справочник / Н.И. Корнилов, Л.К. Берестень, Д.И. Коган, В.С. Травкин. – М.: Недра, 1979. – 359 с.

24. Справочник инженера по бурению разведочных скважин. Т. 1 / под общ. ред. Е.А. Козловского. – М.: Недра, 1984. – 512 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



Increasing the durability of drill bit teeth by changing its manufacturing technology

Javokhir Toshov^{1, a}, Doniyor Fozilov^{2, b}, Kassym Yelemessov^{3, c}, Ulugbek Ruziev^{2, d},
 Dovudjon Abdullayev^{2, e}, Dinara Baskanbayeva^{3, f, *}, Lala Bekirova^{4, g}

¹ Tashkent State Technical University, 2, University st., Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan

² JSC "Scientific and Production Association" Almalyk MMC", 1 V. Gaidarova st., Chirchik, 111700, Republic of Uzbekistan

³ K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, 2 Satbaev st., Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan

⁴ Azerbaijan State Oil and Industry University, 34 Azadliq Ave., Baku, AZ1010, Azerbaijan

^a <https://orcid.org/0000-0003-4278-1557>, j.toshov@tdtu.uz; ^b <https://orcid.org/0009-0005-6362-8326>, fozilovdoniyor81@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>, k.yelemessov@satbayev.university; ^d <https://orcid.org/0009-0008-2371-3085>, u.ruziev@agmk.uz;

^e <https://orcid.org/0009-0005-6362-8326>, dn.abdullaev@agmk.uz; ^f <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>, d.baskanbayeva@satbayev.university;

^g <https://orcid.org/0000-0003-0584-7916>, lala.bakirova@asoiu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 August 2024

Revised: 10 September 2024

Accepted: 17 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Drill bits

Tungsten-cobalt alloys

Manufacturing

Pin bit

Hard rocks

Performance testing

Funding

This research was funded by Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number IRN BR18574141.

ABSTRACT

Introduction. The development of the mining industry requires increasing the durability and safe tool performance life. For bits of mining drilling machines, this problem is often solved by improving the material of the teeth of these bits. The paper presents the results of a study on the development of a technology for the manufacture of hard-alloy drill bits with increased wear resistance and testing of prototypes when drilling hard rocks. Changes in technology have led to changes in the shape of the tooth. Also, purer tungsten powder was used as the initial component. **Research methods.** The paper studies carbide teeth of bits manufactured at JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine using standard and modified technology. Its structure and chemical composition were studied. **Results and discussion.** New methods for performing technological operations for the manufacture of carbide teeth (pins) and steel pin bits are developed and mastered. Tungsten-cobalt teeth were manufactured using VK10KS (90 %W; 10 % Co) hard alloy, produced using tungsten carbide powder synthesized by carbidization of purified tungsten powder. The shape of the tooth surface was changed from ballistic to semi-ballistic. Metallic cobalt powder was used as a binder. Pin bits of the KNSh40×25 type are made of 0.35 C-Cr-Mn-Si steel. Tests of experimental bits were carried out at several mines, as a result of which its suitability for drilling rocks with a hardness of $f = 14-18$ was established. The results of industrial operation showed that the durability of the teeth of bits manufactured by JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine is not significantly inferior to bits from European manufacturers. At the same time, the cost of such bits is several times lower.

For citation: Toshov J.B., Fozilov D.M., Yelemessov K.K., Ruziev U.N., Abdullayev D.N., Baskanbayeva D.D., Bekirova L.R. Increasing the durability of drill bit teeth by changing its manufacturing technology. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 112–124. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-112-124. (In Russian).

References

1. Zhukov I.A., Golikov N.S., Martyushev N.V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14 (1), pp. 142–150. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150. (In Russian).

* Corresponding author

Baskanbayeva Dinara D., Ph.D. (Engineering), Deputy Director
 K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,
 2 Satbaev st.,
 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan
 Tel.: +7 701 861 5162, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university



2. Galachieva S.V., Makhosheva S.A., Lyutikova L.A., Tlekhugov A.M. A logical approach to building a machine learning model for assessing the sustainable development of mountain areas. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15 (4), pp. 921–928. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-921-928. (In Russian).
3. Klyuev R.V. System analysis of calculation methods for power supply systems in quarry points. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2024, vol. 16 (1), pp. 302–310. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310. (In Russian).
4. Zhu L., Wei T., Liu B., Yu T. Simulation analysis of rock braking mechanism of tunnel boring machine. *Technical Gazette*, 2016, vol. 23 (6), pp. 1585–1590. DOI: 10.17559/TV-20141107084349.
5. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.
6. Zhao H., Wu H., Shen L., Zhu Zh., Shan Y. Research on slim-hole drilling technology for shale gas geological survey in China. *Petroleum Research*, 2024, vol. 9 (3), pp. 451–461. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2024.03.006.
7. Zykova A., Martyushev N., Skeebe V., Zadkov D., Kuzkin A. Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys. *Materials*, 2019, vol. 12 (6), p. 981. DOI: 10.3390/ma12060981.
8. Stoxreiter T., Martin A., Teza D., Galler R. Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, vol. 108, pp. 179–188. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.06.007.
9. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 912–916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.
10. Balci C., Bilgin N. Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, vol. 44 (3), pp. 468–476. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.001.
11. Zverev E.A., Skeebe V.Yu. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 132–137. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.
12. Niu Z., Jiao F., Cheng K., An innovative investigation on chip formation mechanisms in micro-milling using natural diamond and tungsten carbide tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 31 (1), pp. 382–394. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.11.023.
13. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.
14. Liu X., Tang P., Li X., Tian M. Self-rotatory performance of conical cutter interacted with rock material. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 80, pp. 197–209. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.06.030.
15. Toshov Zh.B., Sherov K.T., Absadykov B.N., Juraev R.U., Sikhimbaev M.R. Efficiency of well drilling with air blowing based on the use of a vortex tube. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2023, vol. 4 (460), pp. 225–235. DOI: 10.32014/2023.2518-170X.331.
16. Teplyakova A.V., Zhukov I.A., Martyushev N.V. Application of drilling machines with impact cam mechanism in various mining and geological conditions. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14 (3), pp. 501–511. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-501-511. (In Russian).
17. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15 (1), pp. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16. (In Russian).
18. Toshov J.B. The questions of the dynamics of drilling bit on the surface of well bottom. *Archives of Mining Sciences*, 2016, vol. 61 (2), pp. 275–283. DOI: 10.1515/amsc-2016-0020.
19. Toshov J.B., Sherov K.T., Sikhimbaev M.R., Absadykov B.N., Esirkepov A. Analysis of interaction of rock breaking tool with rock in the drilling process. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2024, vol. 1 (463), pp. 271–281. DOI: 10.32014/2024.2518-170X.380.
20. Bashlyk S.M., Zagibailo G.T. *Burenje skvazhin [Drilling wells.]* Moscow, Nedra Publ., 1983. 447 p.
21. Tian J., Pang X., Liang Z., Yang L., Zhang L., Wei Q., Li Y., Zhu Y. Kinematic features of a new drill bit of the tornado-like bottom-hole model. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, vol. 34 (6), pp. 1163–1167.

22. Mendebayev T.N., Smashov N.Zh. Multi-chamber downhole hydraulic machine of rotary type for wells. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14 (2), pp. 303–309. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-303-309.

23. Kornilov N.I., Beresten' L.K., Kogan D.I., Travkin V.S. *Porodorezhushchii instrument dlya geologorazvedochnykh skvazhin* [Rock-cutting tool for exploration wells]. Handbook. Moscow, Nedra Publ., 1979. 359 p.

24. Kozlovskii E.A., ed. *Spravochnik inzhenera po bureniyu razvedochnykh skvazhin*. T. 1. [Handbook of an engineer on drilling exploratory wells. Vol. 1]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 512 p.

Conflicts of Interest

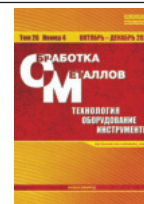
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Исследование распределения нормальных контактных напряжений в очагах деформации при горячей прокатке полос из конструкционных низколегированных сталей для повышения стойкости рабочих валков

Иван Поспелов^{а, *}

Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, г. Череповец, 162600, Россия

^а  <https://orcid.org/0009-0000-5974-5718>,  idospelpov@chsu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.771.073

История статьи:

Поступила: 23 августа 2024

Рецензирование: 16 сентября 2024

Принята к печати: 02 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Нормальные контактные
напряжения

Конструкционные низколегированные
стали

Очаг деформации

Модуль упругости полосы

Контактная прочность рабочих
валков

Благодарности

Часть исследований выполнена в условиях ПАО «Северсталь».

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе эксплуатации рабочих валков чистовых групп непрерывных широкополосных станов горячей прокатки решающее влияние на их стойкость и прочность оказывают нормальные контактные напряжения, особенно при прокатке сортамента из низколегированных конструкционных сталей минимального диапазона толщин 5,5...2,0 мм, не соответствующего паспортным характеристикам таких станов. **Предмет.** Выполненные ранее исследования напряженно-деформированного состояния прокатываемой полосы в очагах деформации позволяют оценивать уровень нормальных контактных напряжений, действующих на рабочие валки при горячей прокатке полос из низкоуглеродистых сталей. В статье рассмотрены результаты исследования напряженного состояния полос из низколегированных конструкционных сталей при контакте с валками с учетом особенностей химического состава металла и изменения его упругих свойств в процессе деформации при температурах горячей прокатки. Полученные результаты применимы к оценке контактной прочности рабочих валков чистовой группы прокатного стана. **Цель работы.** Исследование распределения нормальных контактных напряжений в очагах деформации при горячей прокатке полос из низколегированных конструкционных сталей для обеспечения высокой стойкости рабочих валков. **Материал и методика исследований.** Исследование построено на основе упругопластической модели и уравнений расчета нормальных контактных напряжений для каждого участка очага деформации. Подробно изучена специфика изменения модуля Юнга (модуля упругости) низколегированных конструкционных сталей в соответствии с определенными температурами горячей прокатки и проведена оценка контактной прочности высокохромистых чугунов рабочих валков. **Результаты и их обсуждение.** Получено достоверное уравнение регрессии для определения значений модуля упругости прокатываемой полосы в функции изменения температур горячей прокатки. Представлены результаты численного эксперимента в виде расчета максимальных нормальных контактных напряжений по упругопластической модели очага деформации. Получена оценка контактной прочности рабочих валков при осуществлении процесса горячей прокатки по реальным режимам на действующем стане. Предложены новые усовершенствованные технологические режимы горячей прокатки низколегированных конструкционных сталей 10ХСНД, 18ХГТ и 14Г2АФ, позволяющие снизить максимальные контактные напряжения и повысить стойкость рабочих валков.

Для цитирования: Поспелов И.Д. Исследование распределения нормальных контактных напряжений в очагах деформации при горячей прокатке полос из конструкционных низколегированных сталей для повышения стойкости рабочих валков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 125–137. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-125-137.

Введение

Освоение технологии производства горячекатаных полос из конструкционных низколегированных сталей для сварных конструкций диапазона толщин 5,5...2,0 мм является при-

оритетной задачей развития современного листопрокатного производства. Одновременно с усложнением сортамента, не соответствующего паспортным характеристикам непрерывных широкополосных станов горячей прокатки, и с повышением требований к производительности оборудования необходимо уменьшать расходный коэффициент рабочих валков и увеличивать их стойкость, так как расходы на валки в структуре затрат прокатного передела достигают 15–20 % [1].

*Адрес для переписки

Поспелов Иван Дмитриевич, к.т.н., доцент
Череповецкий государственный университет,
пр. Луначарского, 5,
162600, г. Череповец, Россия
Тел.: +7 963 353-53-71, e-mail: idospelpov@chsu.ru

Резервы повышения стойкости при эксплуатации рабочих валков станов горячей прокатки представлены в ряде работ [2–9] применительно к прямому влиянию температуры процесса горячей прокатки на возникающие в валках напряжения. Однако материалы указанных выше работ практически не учитывают особенности напряженно-деформированного состояния контакта полосы с рабочими валками [10–12]. В то же время использование методов расчета такого напряженно-деформированного состояния, основанных на упругопластической модели очага деформации [10–12], показало, что расчеты нуждаются в некоторых уточнениях. В материалах публикации [13] показано влияние различных диапазонов температур горячей прокатки и фактических химических составов сталей с содержанием углерода менее 0,25 % на упругие и пластические свойства полос, деформируемых на стане. В этой же работе [13] получен вывод о том, что длина упругих участков может достигать 32–40 % от общей длины очага деформации; ранее эта особенность не учитывалась.

Описанные изменения структуры очагов деформации при производстве конструкционных низколегированных марок сталей минимального диапазона толщин 5,5...2,0 мм приводят к проблеме снижения стойкости рабочих валков в последних клетях непрерывных широкополосных станов горячей прокатки из-за увеличения нормальных контактных напряжений в очаге деформации. Как показали дальнейшие расчеты, они возрастают до опасного уровня 1068...1245 МПа, который характерен для станов холодной прокатки [10]. Эффективное решение проблемы повышения стойкости при эксплуатации рабочих валков на этапе разработки технологических режимов горячей прокатки на современных металлургических предприятиях необходимо начинать с надежных методов расчета энергосиловых параметров и напряженно-деформированного состояния полосы в контакте с рабочими валками [11–13].

Цель работы заключается в исследовании распределения нормальных контактных напряжений в очагах деформации при горячей прокатке полос из низколегированных конструкционных сталей в области обеспечения высокой стойкости рабочих валков.

Задачи работы: дополнение методики расчета нормальных контактных напряжений при производстве низколегированных конструкционных углеродистых сталей; построение линейной регрессии в рамках расчета модуля упругости; исследование распределения нормальных контактных напряжений в очагах деформации при горячей прокатке с учетом особенностей их напряженно-деформированного состояния на основе имеющегося технологического режима; совершенствование технологии производства горячекатаных полос из низколегированных конструкционных сталей в чистовой группе широкополосного стана для обеспечения высокой стойкости рабочих валков; оценка эффективности разработанной методики и новых вариантов режимов горячей прокатки.

Методика исследований

На основе моделирования напряженно-деформированного состояния полосы при горячей прокатке [11–13] в табл. 1 указаны формулы расчета $p_x(h_x)$ для упругих и пластических участков очага деформации. Длины таких участков обозначаются x_1, x_4 и x_2, x_3 соответственно. Формулы позволяют изучить и выявить закономерности изменения максимальных нормальных контактных напряжений $p_{1\max}, p_{4\max}$ и $p_{x\max}$, распределенных по длине очага деформации l_c на рис. 1.

Из табл. 1 видно, что расчет нормальных контактных напряжений $p_x(h_x)$ горячей прокатки полосы при известных значениях абсолютного обжатия $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$ и удельных межклетевых натяжений σ_{i-1} и σ_i напрямую зависит от правильного определения модуля упругости E_{Π} , коэффициента трения в очаге деформации μ_i и фактического сопротивления пластической деформации σ_{Π} . Особенности определения значений μ_i и σ_{Π} в зависимости от деформационно-скоростных параметров, материала рабочих валков и химического состава прокатываемой стали при горячей прокатке представлены в работах [12–14].

Особый интерес для исследования при прокатке конструкционных низкоуглеродистых сталей представляет изменение модуля упругости полосы E_{Π} при температурах 1050...750 °С, имеющих место в чистовых клетях станов горячей прокатки. Для сталей 14Г2АФ, 18ХГТ

Формулы расчета нормальных контактных напряжений $p_x(h_x)$ Formulas for calculating normal contact stresses $p_x(h_x)$

Первый упругий участок длиной x_1 / The first elastic section with a length of x_1	Второй упругий участок длиной x_4 / The second elastic section with a length of x_4
$p_x = 1,15E_{\Pi} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} - \frac{2}{\delta_{i-1} + 1} \left(\frac{h_x}{h_{i-1}} \right) + \left(\frac{h_{i-1}}{h_x} \right)^{\delta_{i-1}} + \left[\frac{\delta_{i-1} - 1}{(\delta_{i-1} + 1)\delta_{i-1}} - \frac{\sigma_{i-1}}{1,15E_{\Pi}} \right] \right\},$ где $\delta_{i-1} = \frac{\mu_i}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$	$p_x = 1,15E_{\Pi} \left\{ \frac{1}{\delta_i} - \frac{2}{\delta_i + 1} \left(\frac{h_x}{h_i} \right) + \left(\frac{h_i}{h_x} \right)^{\delta_i} \left[\frac{\delta_i - 1}{(\delta_i + 1)\delta_i} - \frac{\sigma_i}{1,15E_{\Pi}} \right] \right\},$ где $\delta_i = \frac{\mu_i}{\operatorname{tg}(\beta)}$
Пластический участок / Plastic section	
$p_x = 1,15\sigma_{\text{пл}} \left[\frac{0,5}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{(h_1 - h_x)}{(h_1 - h_n)} + \left(1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{h_n}{(h_1 - h_n)} \right) + (\ln(h_x) - \ln(h_1)) + \frac{p_1}{1,15\sigma_{\phi}} \right]$	

и 10ХСНД, выбранных для дальнейших расчетов нормальных контактных напряжений при прокатке и оценки стойкости рабочих валков чистовой группы непрерывного широкополосного стана «2000» ПАО «Северсталь», зависимость E_{Π} от температуры по справочным данным [15] имеет вид, показанный на рис. 2.

Для оценки контактной прочности рабочих валков при прокатке использовали стандартные методы расчета, предназначенные для всех деталей машин. Чтобы применить эти общепринятые методы к чугунным валкам прокатных станов, выполнили корректировку по формуле допускаемых напряжений для схемы сжатия из работы [16]:

$$[\sigma] = 1,5\sigma_B, \quad (1)$$

где σ_B – предел прочности при сжатии материала рабочих валков, МПа.

Результаты и их обсуждение

Для использования данных рис. 2 в дальнейших расчетах контактных напряжений в очагах деформации была выполнена линейная аппрок-

симация зависимости модуля упругости (модуля Юнга) E_{Π} от температуры применительно к горячей прокатке полос, и получено уравнение с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9869$ и расчетным значением критерия Фишера:

$$E_{\Pi} = 2,1778 - 0,0011t_i, \quad (2)$$

где t_i – температура прокатываемой полосы в i -й клетки стана, °С.

Значение критерия Фишера больше табличного, поэтому представленное уравнение линейной регрессии (2) значимо и дает точный и достоверный прогноз.

Для исследования распределения нормальных контактных напряжений при контакте полосы с рабочими валками использовали реальный технологический режим прокатки полосы из стали 10ХСНД толщиной 2,1 мм и шириной 1270 мм в чистовой семиклетьевой группе стана «2000» ПАО «Северсталь» в наиболее загруженных во время горячей прокатки клетях (№ 7, 9 и 11 соответственно). При исследовании напряжений применили описанные выше особенности горячей прокатки низколегированных конструкционных сталей и расчетные формулы из

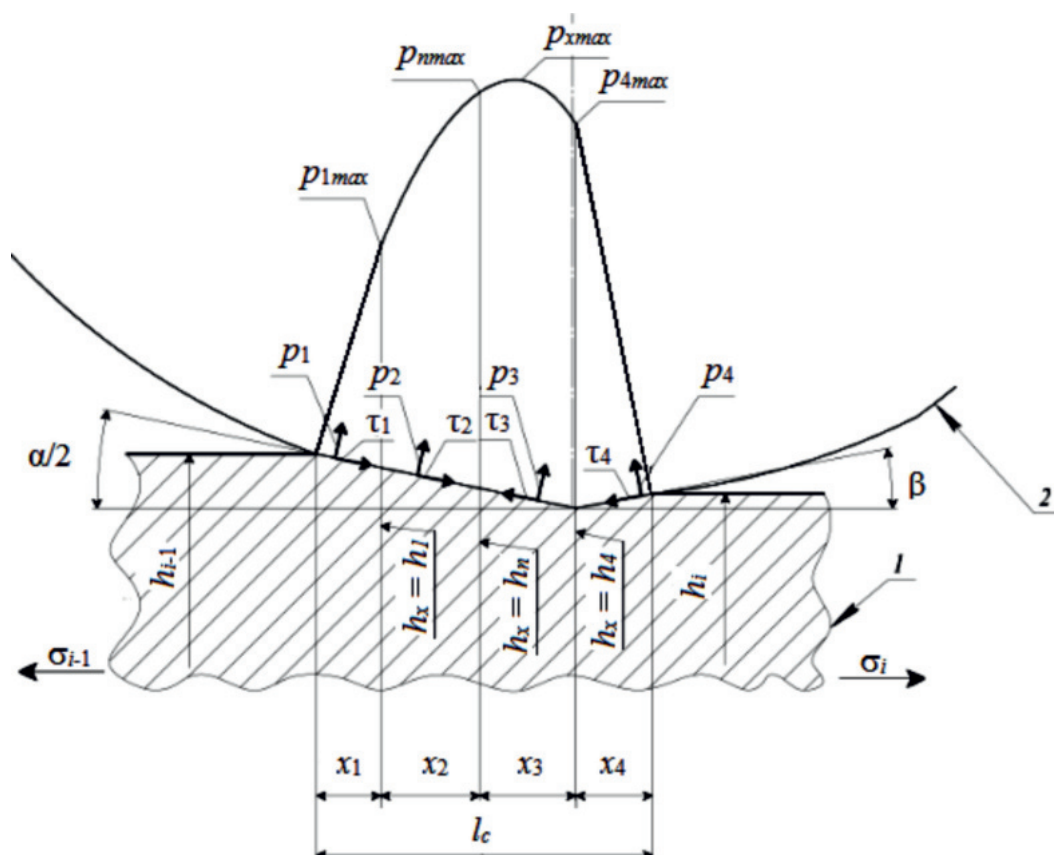


Рис. 1. Схема распределения нормальных контактных напряжений в очаге деформации при горячей прокатке:

1 – деформируемая полоса; 2 – рабочий валок; h_{i-1} , h_i – толщина полосы до и после прокатки, мм; h_1 , h_4 – толщина полосы на границах первого и второго упругих участков, мм; h_n – толщина в нейтральном сечении, мм; x_1 , x_4 – длины упругих участков, мм; x_2 , x_3 – длины пластических участков отставания и опережения, мм; τ_i – контактные касательные напряжения, МПа; p_i – нормальные контактные напряжения, МПа; α – угол захвата полосы; β – угол наклона очага деформации на втором упругом участке, град; σ_{i-1} , σ_i – заднее и переднее натяжения, МПа

Fig. 1. Distribution pattern of normal contact stresses in the deformation zone during hot rolling:

1 – deformable strip; 2 – working roll; h_{i-1} , h_i – thickness of the strip before and after rolling, mm; h_1 , h_4 – thickness of the strip at the boundaries of the first and second elastic sections, mm; h_n – thickness in neutral section, mm; x_1 , x_4 – lengths of elastic sections, mm; x_2 , x_3 – lengths of the plastic sections of lag and advance, mm; τ_i – contact tangential stresses, MPa; p_i – normal contact stresses, MPa; α – angle of nip of the strip; β – angle of inclination of the deformation zone on the second elastic section, deg; σ_{i-1} , σ_i – back and front tensions, MPa

табл. 1. Целевой химический состав указанной марки стали, ее технологический режим прокатки, структурные параметры очагов деформации и расчетные значения нормальных контактных напряжений в вышеуказанных клетях представлены в табл. 2.

На рис. 3 схематично показаны распределения максимальных нормальных контактных напряжений на пластическом участке в 7, 9 и 11-й клетях при горячей прокатке полосы по указанному режиму в табл. 2. Данный пластический участок целиком состоит из зоны прилипания

[11–13]. Из расчетных значений табл. 2 и рис. 3 видно, что максимальные значения контактных напряжений $p_{x \max}$ действуют на пластическом участке очага деформации в зоне отставания длиной x_2 (рис. 1) рядом с нейтральным сечением, а также видно незначительное снижение таких напряжений до максимальных значений $p_{4 \max}$ на границе пластического и второго упругого участка. Учитывая изложенное, при определении напряженно-деформированного состояния полосы в контакте с рабочими валками, особенно при расчете x_4 и $p_{4 \max}$, необходимо учитывать

Рис. 2. Изменение модуля упругости низколегированных конструкционных сталей в зависимости от температуры испытаний

Fig. 2. Change in the modulus of elasticity of low-alloy structural steels depending on the test temperature

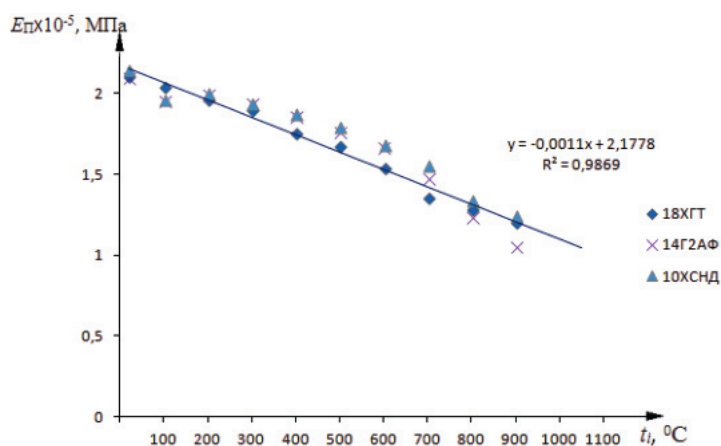


Таблица 2

Table 2

Химический состав стали 10ХСНД, технологический режим прокатки и результаты расчета структурных параметров очага деформации и нормальных контактных напряжений

Chemical composition of 0.1 C-Cr-Si-Ni-Cu steel, rolling process condition and the results of calculating the structural parameters of the deformation zone and normal contact stresses

Химический состав, % / Chemical composition, %										
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V
0,102	0,87	0,55	0,63	0,05	0,53	0,016	0,46	0,001	0,003	0,002
Клеть № / Rolling stand No.								7	9	11
Толщина за клетью h_p , мм / Outgoing thickness h_p , mm								10,43	3,99	2,33
Относительное обжатие ε_p , % / Percentage reduction ε_p , %								48,16	34,27	19,09
Заднее натяжение σ_{i-1} , МПа / Back tension σ_{i-1} , MPa								20	30	40
Переднее натяжение σ_p , МПа / Front tension σ_p , MPa								30	30	40
Скорость прокатки v_p , м/с / Rolling speed v_p , m/s								2,3	5,76	10,36
Температура полосы t_p , °C / Strip temperature t_p , °C								1024	984	939
Коэффициент трения μ_i / Coefficient of friction μ_i								0,418	0,295	0,24
Соппротивление пластической деформации $\sigma_{пл}$, МПа / Plastic resistance σ_{pl} , MPa								167	239,9	315,1
Модуль Юнга рабочих валков E_B , МПа / Young's modulus of working rolls E_R , MPa								205 000	185 000	185 000
Модуль Юнга полосы $E_{П}$, МПа / Young's modulus of strip E_S , MPa								105 165	109 497	114 494
Усилие прокатки P_p , МН / Roll force P_p , MN								33,46	23,13	19,97
Длина очага деформации l_c , мм / Length of deformation zone l_c , mm								63,8	29,56	26,76
Длина упругого участка x_4 , мм / Length of elastic section x_4 , mm								4,85	6,31	8,18
Максимальные нормальные контактные напряжения $p_{1 \max}$, МПа / Maximum normal contact stresses $p_{1 \max}$, MPa								172,6	247,1	327,7
Максимальные нормальные контактные напряжения на пластическом участке $p_{x \max}$, МПа / Maximum normal contact stresses on the plastic section $p_{x \max}$, MPa								332,5	645,9	1067,7
Нормальные контактные напряжения в нейтральном сечении $p_{n \max}$, МПа / Normal contact stresses in the neutral section $p_{n \max}$, MPa								328,5	643,3	1066,9
Максимальные нормальные контактные напряжения $p_{4 \max}$, МПа / Maximum normal contact stresses $p_{4 \max}$, MPa								190,5	378,9	798,3

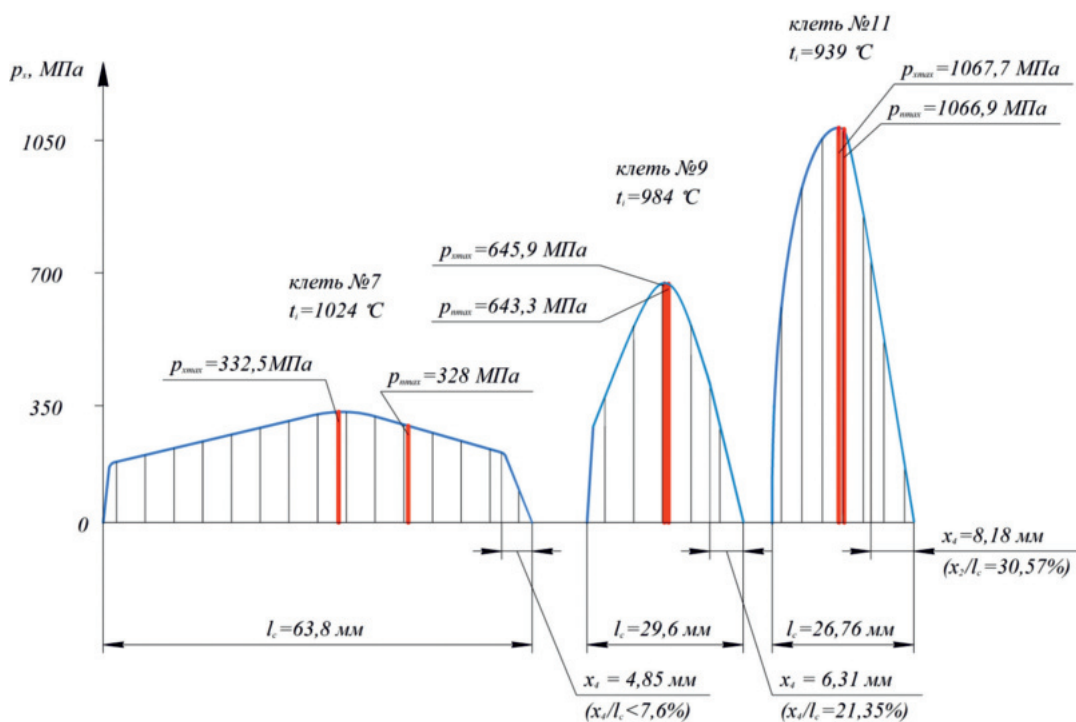


Рис. 3. Схема распределения нормальных контактных напряжений по длине очага деформации в клетях № 7, 9 и 11

Fig. 3. Distribution pattern of normal contact stresses along the length of the deformation zone in rolling stands No.7, No.9 and No.11

особенность изменения модуля упругости стали на рис. 2.

Расчет по формуле (1) с учетом испытаний предела прочности материала высокохромистых чугуновых рабочих валков $\sigma_B = 700 \dots 800$ МПа [17], используемых в клетях чистовой группы стана «2000», показывает, что допускаемые контактные напряжения находятся в диапазоне $[\sigma] = 1050 \dots 1200$ МПа. Сопоставляя максимальные расчетные нормальные контактные напряжения $p_{x \max}$ из табл. 2 и представленные выше допускаемые напряжения $[\sigma]$, можно сделать вывод, что наибольшую опасность они представляют для рабочих валков клетки № 11, так как в нескольких расчетных точках очага деформации $p_{x \max}$ и $p_{n \max}$ (рис. 3) напряжения попадают в диапазон допускаемых $[\sigma]$. Факт максимальной загрузки валковой системы «кварто» клетки № 11 по существующей технологии производства в чистовой группе стана «2000» подтверждается также исследованиями в работе [18].

Опасность дальнейшего увеличения максимальных контактных напряжений $p_{x \max}$ значительно возрастает при горячей прокатке участков полос с увеличенной продольной разнотолщиной из-за колебаний усилий P_i в функции всех

значимых технологических факторов [19, 20], поэтому при таком многократном нагружении и возникновении значительных температурных напряжений увеличиваются риски повреждения поверхности, снижения стойкости или разрушения рабочих валков и аварийных перевалок [21–23]. Следует также отметить, что прокатка сортамента низколегированных конструкционных сталей в условиях реального производства чистовой группы выполняется перед плановыми перевалками всех клеток стана «2000», поэтому расчетные значения максимальных контактных напряжений $p_{x \max}$ и $p_{n \max}$ (рис. 3) действительно сказываются на стойкости рабочих валков.

Резервом совершенствования технологии производства горячекатаных высокопрочных стальных полос в чистовой группе широкополосного стана для обеспечения высокой стойкости рабочих валков может служить материал работ [19, 20]. Суть предлагаемого совершенствования при прокатке полос из высокопрочных сталей состоит в том, что увеличение относительных обжатий ϵ_i в трех первых по ходу прокатки клетях чистовой группы стана «2000» до максимальных допустимых паспортных значений стана обжатий $\epsilon_{i \max}$ или усилий $P_{i \max}$

не оказывает существенного влияния на рост максимальных нормальных контактных напряжений $p_{x \max}$ из-за высоких температур прокатки (табл. 2). Уменьшение обжатий и увеличение удельных межклетевых натяжений σ_{i-1} и σ_i до максимально возможных значений ≤ 60 МПа, как показал успешный опыт внедрения на различных станах горячей прокатки в работах [19, 20], по ходу прокатки в последних клетях значительно снижает в них колебания усилий P_i и толщины полос.

В табл. 3 представлены технологические ограничения, новые расчетные режимы и значения нормальных контактных напряжений в вышеуказанных клетях № 7, 9 и 11. Табл. 3 является иллюстрирующим примером эффективности

разработанного метода перераспределения обжатий и увеличения межклетевых натяжений в области снижения контактных напряжений при горячей прокатке полосы сортамента 2,1×1270 мм из стали 10ХСНД.

Эффективность начальной настройки технологических режимов горячей прокатки низколегированной конструкционной стали 10ХСНД по изложенному выше принципу показывает снижение максимальных нормальных контактных напряжений в клетях № 11 до безопасного диапазона расчетных значений $p_{x \max} = 837,5 \dots 838$ МПа (табл. 3). Стойкость рабочих валков клетки № 7 при увеличении обжатия до максимального значения $\varepsilon_{i \max}$, как показали расчеты напряжений $p_{x \max}$ (табл. 3), не зависит от нормальных

Таблица 3

Table 3

Ограничения технологических параметров, новый режим прокатки и результаты расчета нормальных контактных напряжений

Technological constraints, new rolling schedule and calculation results of normal contact stresses

Клеть № / Rolling stand No.	7	9	11
Максимальное относительное обжатие $\varepsilon_{i \max}$, % / Maximum percentage reduction $\varepsilon_{i \max}$, %	50	30	25
Максимальное усилие прокатки $P_{i \max}$, МН / Maximum roll force $P_{i \max}$, MN	35	28	20
Максимальное заднее натяжение $\sigma_{i-1 \max}$, МПа / Maximum back tension $\sigma_{i-1 \max}$, MPa	22	35	47
Максимальное переднее натяжение $\sigma_{i \max}$, МПа / Maximum front tension $\sigma_{i \max}$, MPa	31	42	55
Расчетная скорость прокатки v_p , м/с / Estimated rolling speed v_p , m/s	1,97	6,08	11,41
Расчетная температура полосы t_p , °C / Specified temperature of the strip t_p , °C	1016	975	935
Расчетное относительное обжатие ε_p , % / Estimated percentage reduction ε_p , %	50	20,45	10
Сопротивление пластической деформации $\sigma_{пл}$, МПа / Plastic resistance σ_{pl} , MPa	174	247	313
Модуль Юнга полосы $E_{пл}$, МПа / Young's modulus of strip E_s , MPa	105 981	110 479	114 922
Усилие прокатки P_p , МН / Rolling force P_p , MN	33,81	14,93	12,4
Максимальные расчетные нормальные контактные напряжения на пластическом участке $p_{x \max}$, МПа / Maximum estimated normal contact stresses on the plastic section $p_{x \max}$, MPa	350,1	634,73	837,5
Нормальные расчетные контактные напряжения в нейтральном сечении $p_{n \max}$, МПа / Estimated normal contact stresses in the neutral section $p_{n \max}$, MPa	341,7	633,85	838

контактных напряжений в контакте полосы и рабочего вала. Решающими факторами технологии являются высокая температура прокатки t_p , оказывающая существенное влияние на тепловые деформации, и эффективное охлаждение бочки рабочих валков [24].

Аналогичные расчеты максимальных контактных напряжений $p_{x \max}$ и $p_{n \max}$ были выполнены для сталей 18ХГТ и 14Г2АФ (табл. 4) при горячей прокатке в чистовой группе клетей из подката толщиной 35,5 мм до толщины 2,1 мм, чтобы показать целесообразность применения новых оптимизированных режимов по сравнению с рабочими для повышения контактной прочности рабочих валков. Из табл. 4 видно, что с увеличением содержания углерода и легирующих элементов в конструкционных сталях 18ХГТ и 14Г2АФ при горячей прокатке по рабочим режимам возрастают максимальные контактные напряжения до диапазона значений $p_{x \max} = 1095,7...1245$ МПа, которые превосходят допускаемые $[\sigma] = 1200$ МПа. Результаты вычислений в табл. 3 и 4 позволяют сделать вывод о том, что алгоритм оптимизации технологических режимов горячей прокатки из работ [19, 20] может быть использован для совершенствова-

ния технологии прокатки полос с целью обеспечения высокой стойкости рабочих валков путем снижения максимальных контактных напряжений до диапазона 838...1023 МПа.

Выводы

1. Методика расчета нормальных контактных напряжений на упругих участках очага деформации при прокатке низколегированных конструкционных углеродистых сталей дополнена зависимостью изменения модуля упругости полос от температуры.

2. Получено уравнение регрессии для прогнозирования расчетных значений модуля упругости таких сталей в функции изменения температуры горячей прокатки.

3. Выполнено исследование распределения нормальных контактных напряжений по длине очага деформации с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния полосы при контакте с рабочими валками. Исследование проводилось на основе существующего технологического режима горячей прокатки в наиболее нагруженных клетях чистовой группы стана «2000». По результатам исследования от-

Таблица 4

Table 4

Рабочие и новые режимы горячей прокатки и результаты расчета максимальных нормальных контактных напряжений

Operating and new rolling schedule and calculation results of maximum normal contact stresses

Сталь / Steel	Режим прокатки / Rolling schedule	Клеть № / Rolling stand No.	$\varepsilon_p, \%$	$\frac{\sigma_{i-1}}{\sigma_p} / \frac{\sigma_{i-1}}{\sigma_p}, \text{ МПа} / \text{ МПа}$	$\frac{p_{x \max}}{p_{x \max}}, \text{ МПа} / \text{ МПа}$	$\frac{p_{n \max}}{p_{x \max}}, \text{ МПа} / \text{ МПа}$
18ХГТ / 0.18 C-Cr-Mn-Ti	Рабочий / Operating schedule	7	48,5	20/30	337	329,6
		9	34,3	30/30	685	682,5
		11	21,3	40/40	1096,5	1095,7
	Новый режим / New schedule	7	50	24/32	393,5	386
		9	30	37/43	664	663
		11	18,9	49/58	939	938
14Г2АФ / 0.14 C-2 Mn-N-V	Рабочий / Operating schedule	7	47,9	20/30	378	370
		9	33,8	30/30	750,2	748
		11	22,1	40/0	1245	1243,4
	Новый режим / New schedule	7	50	30/35	441	433
		9	30	40/48	732,6	731
		11	19,1	50/60	1023	1021,9



мечено, что существующие технологические режимы прокатки приводят к росту максимальных контактных напряжений в клетки № 11 чистовой группы стана горячей прокатки «2000» ПАО «Северсталь» до опасного диапазона значений 1068...1245 МПа на пластическом участке очага деформации. Стойкость рабочих валков к несвоевременному аварийному разрушению при воздействии указанных максимальных напряжений, попадающих в диапазон допускаемых контактных напряжений $[\sigma] = 1050 \dots 1200$ МПа и более, объясняется тем, что в зоне контакта материал рабочих валков находится в благоприятных условиях всестороннего упругого сжатия.

4. На основе ранее разработанных принципов оптимизации технологических режимов горячей прокатки для уменьшения колебаний толщины и усилий рассчитаны и предложены усовершенствованные режимы обжаты и удельных межклетевых натяжений, которые позволяют снижать и поддерживать максимальные нормальные контактные напряжения в клетки № 11 чистовой группы в безопасном диапазоне 838...1023 МПа.

5. Сделан вывод о том, что разработанный подход оценки стойкости рабочих валков чистовых групп станов горячей прокатки при воздействии на них нормальных контактных напряжений и новый усовершенствованный вариант начальной настройки режимов можно применять при проектировании эффективной технологии прокатки низколегированных конструкционных сталей минимального диапазона толщин 5,5...2,0 мм.

Список литературы

1. Гостев К.А. Оптимизация прокатных валков в целях снижения совокупной стоимости владения // Сталь. – 2021. – № 10. – С. 19–24.
2. Simulation of thermal stress and fatigue life prediction of high speed steel work roll during hot rolling considering the initial residual stress / K. Hu, F. Zhu, J. Chen, N.-A. Noda, W. Han, Y. Sano // Metals. – 2019. – Vol. 9 (9). – P. 966. – DOI: 10.3390/met9090966.
3. The influence of rolling mill process parameters on roll thermal fatigue / F. Weidlich, A.P.V. Braga, L.G. da Silva Lima, G. Boccacini, R.M. Souza // International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2019. – Vol. 102. – P. 2159–2171. – DOI: 10.1007/s00170-019-03293-1.
4. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling

experiment and modeling / G.Y. Deng, Q. Zhu, A.K. Tieu, H.T. Zhu, M. Reid, A.A. Saleh, L.H. Su, T.D. Ta, J. Zhang, C. Lu // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 240. – P. 200–208. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.025.

5. Kiss I., Pinca Bretotean C., Josan A. Experimental research upon the durability in exploitation of the Adamite type rolls // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 393 (1). – P. 012090. – DOI: 10.1088/1757-899X/393/1/012090.

6. Modelling surface thermal damage to mill rolls / R. Mercado-Solis, J. Talamantes-Silva, J. Beynon, M. Hernandez-Rodrigues // Wear. – 2007. – Vol. 263 (17–20). – P. 1560–1567. – DOI: 10.1016/j.wear.2006.12.062.

7. Experimental study of heat transfer in hot rolling / P. Kotrbacek, J. Horsky, M. Raudensky, M. Pohanka // Revue de Métallurgie. – 2006. – Vol. 103 (7). – P. 333–341. – DOI: 10.1051/metal:2006134.

8. Pinca-Bretotean C., Josan A., Kumar Sharma A. Influence of thermal stresses on the phenomenon of thermal fatigue of rolling cylinders // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2540 (1). – P. 012023. – DOI: 10.1088/1742-6596/2540/1/012023.

9. Analytical modeling of thermo-mechanically induced residual stresses of work rolls during hot rolling / M. Dünckelmeyer, C. Krempaszy, E. Werner, G. Hein, K. Schörkhuber // Steel Research International. – 2010. – Vol. 81. – P. 86–89.

10. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки тонких широких полос // Производство проката. – 2008. – № 1. – С. 10–15.

11. Effect of sliding and rolling friction on the energy-force parameters during hot rolling in four-high stands / E.A. Garber, I.A. Kozhevnikova, P.A. Tarasov, A.I. Traino // Russian Metallurgy (Metally). – 2007. – Vol. 2007 (6). – P. 484–491. – DOI: 10.1134/S0036029507060080.

12. Simulation of contact stresses and forces during hot rolling of thin wide strips with allowance for a stick zone and elastic regions in the deformation zone / E.A. Garber, I.A. Kozhevnikova, P.A. Tarasov, A.A. Zavrazhnov, A.I. Traino // Russian Metallurgy (Metally). – 2007. – Vol. 2007 (2). – P. 112–119. – DOI: 10.1134/S003602950702005X.

13. Гарбер Э.А., Поспелов И.Д., Кожевникова И.А. Влияние химического состава и упругих свойств полосы и валков на энергосиловые параметры широкополосных станов горячей прокатки // Производство проката. – 2011. – № 8. – С. 2–7.

14. Pospelov I.D., Nechaev R.R. Improving the methodology for calculating the finishing group power

of a continuous wide-strip hot rolling mill // *Steel in Translation*. – 2024. – Vol. 54 (2). – P. 151–156. – DOI: 10.3103/S0967091224700396.

15. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с. – ISBN 5-217-02992-7.

16. Горский А.И., Иванов-Эмин Е.Б., Кореновский А.И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность. – М.: НИИМаш, 1974. – 79 с.

17. Лекомт-Бекерс Ж., Терзиев Л., Брайер Ж.-П. Эксплуатационные свойства прокатных валков из графитового хромистого чугуна // *Сталь*. – 2000. – № 1. – С. 46–50.

18. Ермушин Д.Е., Болобанова Н.Л. Исследование поверхностного деформационного упрочнения бочки опорных валков чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки // *Черные металлы*. – 2023. – № 2. – С. 27–32. – DOI: 10.17580/chm.2023.02.04.

19. Simulation of the longitudinal thickness deviation of the steel strips hot rolled in the continuous group of a broad-strip mill / E.A. Garber, I.D. Pospelov, A.I. Traino, A.F. Savinykh, N.Yu. Nikolaev, P.A. Mishnev // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2012. – Vol. 2012 (9). – P. 831–836. – DOI: 10.1134/S0036029512090042.

20. Оптимизация режима горячей прокатки стальных полос на широкополосном стане по кри-

терию «минимум продольной разнотолщинности» / Э.А. Гарбер, И.Д. Пospelов, А.Ф. Савиных, Н.Ю. Николаев, П.А. Мишнев // *Производство проката*. – 2012. – № 5. – С. 15–21.

21. Failure analysis of work rolls of a thin hot strip mill / P. Palit, H.R. Jugade, A.K. Jha, S. Das, G. Mukhopadhyay // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. – 2015. – Vol. 3. – P. 39–45. – DOI: 10.1016/j.csefa.2015.01.001.

22. Setiawan R., Siradj E., Iman F. Failure analysis of ICDP work roll of hot strip mill: case study of shell-core interface spalling // *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*. – 2022. – Vol. 5 (1). – P. 28–34. – DOI: 10.24036/jptk.v5i1.27023.

23. Investigation of the initial residual stress effects on a work roll maximum in-service stress in hot rolling process by a semi-analytical method / B. Salehebrahimejad, A. Doniavi, M. Moradi, M. Shahbaz // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 99 (9). – P. 53–64. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.084.

24. Повышение эффективности охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки с использованием адаптивных математических моделей теплового баланса / Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, Е.С. Попов, А.Ф. Савиных, А.В. Голованов // *Производство проката*. – 2009. – № 4. – С. 12–24.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Автор. 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 -

Metal Working and Material Science

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



Investigation of the distribution of normal contact stresses in deformation zone during hot rolling of strips made of structural low-alloy steels to increase the resistance of working rolls

Ivan Pospelov ^{a,*}

Cherepovets State University, 5 Lunacharskogo pr., Cherepovets, 162600, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0009-0000-5974-5718>,  idpospelov@chsu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 August 2024

Revised: 16 September 2024

Accepted: 02 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Normal contact stresses

Structural low-alloy steels

Deformation zone

Elastic modulus of the strip

Contact strength of working rolls

Acknowledgements

Some of the research was carried out in the operating conditions of PJSC Severstal.

ABSTRACT

Introduction. During the operation of the working rolls of the finishing groups of continuous wide-strip hot rolling mills, normal contact stresses have a decisive influence on its resistance and strength, especially when rolling a range of low-alloy structural steels with a minimum thickness range of 5.5–2.0 mm, which does not correspond to the passport characteristics of such mills. **The subject of the study.** Previously performed studies of the stress-strain state of the rolled strip in the deformation zones make it possible to estimate the level of normal contact stresses acting on the working rolls during hot rolling of strips of low-carbon steels. The paper discusses the results of the study of the stressed state of strips of low-alloy structural steels in contact with rolls, taking into account the features of the chemical composition of the metal and changes in its elastic properties during deformation at hot rolling temperatures. The results obtained are applicable to the evaluation of the contact strength of the finishing rolls of the rolling mill. **The purpose of the work** is to investigate the distribution of normal contact stresses in the deformation zones during hot rolling of strips of low-alloy structural steels to ensure high resistance of the working rolls. **Material and methods.** The study is based on the elastic-plastic model and equations for calculating normal contact stresses for each section of the deformation zone. The specificity of variation of *Young's* modulus (modulus of elasticity) of low-alloyed structural steels in accordance with certain hot rolling temperatures is studied in detail, and the contact strength of high-chromium cast iron work rolls is evaluated. **Results and discussion.** A reliable regression equation is obtained for determining the values of the Young's modulus of the rolled strip as a function of changing hot rolling temperatures. The results of a numerical experiment are presented in the form of calculating the maximum normal contact stresses using the elastic-plastic model of the deformation zone and assessing the contact strength of the work rolls based on actual rolling conditions on an operating mill. New improved technological modes of hot rolling of low-alloy structural steels (0.1 C-Cr-Si-Ni-Cu, 0.18 C-Cr-Mn-Ti and 0.14 C-2 Mn-N-V) are proposed, which make it possible to reduce the maximum contact stresses and increase the resistance of the working rolls.

For citation: Pospelov I.D. Investigation of the distribution of normal contact stresses in deformation zone during hot rolling of strips made of structural low-alloy steels to increase the resistance of working rolls. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 125–137. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-125-137. (In Russian).

References

1. Gostev K.A. Optimizatsiya prokatnykh valkov v tselyakh snizheniya sovokupnoi stoimosti vladeniya [Optimization of rolling rolls with the purpose of reducing the TCO]. *Stal'* = *Steel in Translation*, 2021, no. 10, pp. 19–24. (In Russian).
2. Hu K., Zhu F., Chen J., Noda N.-A., Han W., Sano Y. Simulation of thermal stress and fatigue life prediction of high speed steel work roll during hot rolling considering the initial residual stress. *Metals*, 2019, vol. 9 (9), p. 966. DOI: 10.3390/met9090966.

* Corresponding author

Pospelov Ivan D., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Cherepovets State University,
5 Lunacharskogo pr.,
162600, Cherepovets, Russian Federation
Tel.: +7 963 353-53-71, e-mail: idpospelov@chsu.ru

3. Weidlich F., Braga A.P.V., da Silva Lima L.G., Bocalini G., Souza R.M. The influence of rolling mill process parameters on roll thermal fatigue. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 2019, vol. 102, pp. 2159–2171. DOI: 10.1007/s00170-019-03293-1.
4. Deng G.Y., Zhu Q., Tieu A.K., Zhu H.T., Reid M., Saleh A.A., Su L.H., Ta T.D., Zhang J., Lu C. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling experiment and modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 240, pp. 200–208. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.025.
5. Kiss I., Pinca Bretotean C., Josan A. Experimental research upon the durability in exploitation of the Adamite type rolls. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 393 (1), p. 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/393/1/012090.
6. Mercado-Solis R.D., Talamantes-Silva J., Beynon J.H., Hernandez-Rodrigues M.A.L. Modelling surface thermal damage to mill rolls. *Wear*, 2007, vol. 263 (17–20), pp. 1560–1567. DOI: 10.1016/j.wear.2006.12.062.
7. Kotrbacek P., Horsky J., Raudensky M., Pohanka M. Experimental study of heat transfer in hot rolling. *Revue de Métallurgie*, 2006, vol. 103 (7), pp. 333–341. DOI: 10.1051/metal:2006134.
8. Pinca-Bretotean C., Josan A., Kumar Sharma A. Influence of thermal stresses on the phenomenon of thermal fatigue of rolling cylinders. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2540 (1), p. 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/2540/1/012023.
9. Dünckelmeyer M., Krempaszy C., Werner E., Hein G., Schörkhuber K. Analytical modeling of thermo-mechanically induced residual stresses of work rolls during hot rolling. *Steel Research International*, 2010, vol. 81, pp. 86–89.
10. Garber E.A., Kozhevnikova I.A. Sopostavitel'nyi analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla i energosilovykh parametrov protsessov goryachei i kholodnoi prokatki tonkikh shirokikh polos [Comparative study of stress-strained state of metal and energy-force parameters of hot and cold rolling processes of thin wide strips]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2008, no. 1, pp. 10–15.
11. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Effect of sliding and rolling friction on the energy-force parameters during hot rolling in four-high stands. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, vol. 2007, pp. 484–491. DOI: 10.1134/S0036029507060080.
12. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A., Zavrazhnov A.A., Traino A.I. Simulation of contact stresses and forces during hot rolling of thin wide strips with allowance for a stick zone and elastic regions in the deformation zone. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, vol. 2007 (2), pp. 112–119. DOI: 10.1134/S003602950702005X.
13. Garber E.A., Pospelov I.D., Kozhevnikova I.A. Vliyanie khimicheskogo sostava i uprugikh svoystv polosy i valkov na energosilovye parametry shirokopolosnykh stanov goryachei prokatki [Influence of practically chemical composition and elastic properties of strip and rolls on calculation accuracy of energy and force parameters in wide strip hot rolling mills]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2011, no. 8, pp. 2–7.
14. Pospelov I.D., Nechaev R.R. Improving the methodology for calculating the finishing group power of a continuous wide-strip hot rolling mill. *Steel in Translation*, 2024, vol. 54 (2), pp. 151–156. DOI: 10.3103/S0967091224700396.
15. Zubchenko A.S., ed. *Marochnik staley i splavov* [Steel and alloy grade guide]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 672 p. ISBN 5-217-02992-7.
16. Gorskii A.I., Ivanov-Emin E.B., Korenovskii A.I. *Opredelenie dopuskaemykh napryazhenii pri raschetakh na prochnost'* [Determination of permissible stresses in strength calculations]. Moscow, NIIMash Publ., 1974. 79 p.
17. Lekomt-Bekers Zh., Terziev L., Braier Zh.-P. Ekspluatatsionnye svoystva prokatnykh valkov iz grafitovogo khromistogo chuguna [Working properties of graphite chrome cast iron rolling rolls]. *Stal' = Steel in Translation*, 2000, no. 1, pp. 46–50. (In Russian).
18. Ermushin D.E., Bolobanova N.L. Issledovanie poverkhnostnogo deformatsionnogo uprochneniya bochki opornykh valkov chistovoi gruppy shirokopolosnogo stana goryachei prokatki [Investigation of surface strain hardening of the barrel of back-up rolls in the finishing group of a broadband hot rolling mill]. *Chernye metally = Stahl und eisen*, 2023, no. 2, pp. 27–32. DOI: 10.17580/chm.2023.02.04. (In Russian).
19. Garber E.A., Pospelov I.D., Traino A.I., Savinykh A.F., Nikolaev N.Yu., Mishnev P.A. Simulation of the longitudinal thickness deviation of the steel strips hot rolled in the continuous group of a broad-strip mill. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012 (9), pp. 831–836. DOI: 10.1134/S0036029512090042.
20. Garber E.A., Pospelov I.D., Savinykh A.F., Nikolaev N.Yu., Mishnev P.A. Optimizatsiya rezhima goryachei prokatki stal'nykh polos na shirokopolosnom stane po kriteriyu «minimum prodol'noi raznotolshchinnosti» [Optimization of hot rolling condition of steel strip on wide-strip mill by «minimum longitudinal crowing» criteria]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2012, no. 5, pp. 15–21.



21. Palit P., Jugade H.R., Jha A.K., Das S., Mukhopadhyay G. Failure analysis of work rolls of a thin hot strip mill. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2015, vol. 3, pp. 39–45. DOI: 10.1016/j.csefa.2015.01.001.
22. Setiawan R., Siradj E., Iman F. Failure analysis of ICDP work roll of hot strip mill: case study of shell-core interface spalling. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 2022, vol. 5 (1), pp. 28–34. DOI: 10.24036/jptk.v5i1.27023.
23. Salehebrahimnejad B., Doniavi A., Moradi M., Shahbaz M. Investigation of the initial residual stress effects on a work roll maximum in-service stress in hot rolling process by a semi-analytical method. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 99 (9), pp. 53–64. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.084.
24. Garber E.A., Khlopotin M.V., Popov E.S., Savinykh A.F., Golovanov A.V. Povyshenie effektivnosti okhlazhdeniya valkov shirokopolosnogo stana goryachei prokatki s ispol'zovaniem adaptivnykh matematicheskikh modelei teplovogo balansa [Improving the efficiency of cooling rolls in a wide-strip hot rolling mill using adaptive mathematical models of heat balance]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2009, no. 4, pp. 12–24.

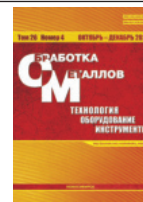
Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2024 The Author. 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)

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


Изготовление электродов-инструментов с оптимизированной конфигурацией для копировально-прошивной электроэрозионной обработки методом быстрого прототипирования

Тимур Абляз ^a, Владимир Блохин ^b, Евгений Шлыков ^{c,*}, Карим Муратов ^d, Илья Осинников ^e

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>, warkk98@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>, ilyuhaosinnikov@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 13 сентября 2024

Рецензирование: 08 октября 2024

Принята к печати: 17 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Метод быстрого прототипирования

Мастер-модель

Точность

Стереолитография

Жидкий фотополимер

Копировально-прошивная электро-эрозионная обработка

Отклонение от плоскостности

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01224, <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>

Благодарности

Авторы выражают благодарность доценту кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Шумкову А.А. за помощь в получении и проектировании мастер-моделей методом быстрого прототипирования.

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты получения сложнопрофильного электрода-инструмента (ЭИ) для копировально-прошивной электроэрозионной обработки по технологии литья. Данный способ заключается в использовании мастер-модели, полученной методом быстрого прототипирования. **Цель работы:** экспериментальное исследование обеспечения точности при изготовлении сложнопрофильных ЭИ методом литья с применением технологии быстрого прототипирования для копировально-прошивной электроэрозионной обработки. **Методы исследования.** Мастер-модель ЭИ изготавливали на установке Envisiontec Perfactory XEDE по технологии стереолитографии. В качестве исходного материала использовался фотополимер Si500. Промежуточные и окончательные измерения отклонения поверхностей выполнены на КИМ Contura Carl Zeiss G2. Расчет литниково-питательной системы выполнен в ПО ProCast. Получена отливка из литейной латуни ЛЦ40С. Исследование процесса копировально-прошивной электроэрозионной обработки электродом-инструментом, изготовленным литьем с применением технологии быстрого прототипирования, проводилось с помощью копировально-прошивного станка Smart CNC в среде трансформаторного масла. Рабочие параметры: время включения импульса T_{on} , мкс; напряжение U , В; сила тока I , А. **Результаты и обсуждение.** Разработана методика проектирования и изготовления сложнопрофильного ЭИ с применением технологии быстрого прототипирования для копировально-прошивной электроэрозионной обработки. Анализ отклонения формы показал, что при изготовлении мастер-модели методом стереолитографии происходит возникновение погрешностей. Экспериментальное исследование отклонения формы мастер-модели показало вогнутость поверхности в диапазоне от 0,03 до 0,07 мм в зависимости от расположения сторон. Показано, что оптимизированная мастер-модель имеет на 25 % меньше отклонений формы. Для изготовления ЭИ по технологии литья разработана литниково-питательная система (ЛПС). При оценивании пористости установлено, что поры сконцентрированы в ЛПС и прибыли, что положительно влияет на качество отливки. Изготовление электрода-инструмента с помощью технологии литья показало, что все параметры точности и шероховатости находятся в заданном допуске и соответствуют исходным данным чертежа. Проведено экспериментальное исследование процесса электроэрозионной обработки профильного паза ЭИ, который был изготовлен методом литья по выплавляемой модели, полученной с применением технологии быстрого прототипирования. Установлено, что размеры полученного паза удовлетворяют заявленным требованиям.

Для цитирования: Изготовление электродов-инструментов с оптимизированной конфигурацией для копировально-прошивной электроэрозионной обработки методом быстрого прототипирования / Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, Е.С. Шлыков, К.Р. Муратов, И.В. Осинников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 138–152. – DOI:10.17212/1994-6309-2024-26.4-138-152.

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

Введение

Для изготовления сложнопрофильных поверхностей применяется механическая обработка. Этот метод имеет ряд технологических и экономических недостатков. Для получения



различных профилей необходимо изготовление различного профильного режущего инструмента, который применим на одном технологическом переходе. В таких условиях производственный цикл изготовления изделия увеличивается из-за частой смены инструмента. При обеспечении необходимого профиля поверхности в основном требуется применение оборудования с возможностью многоосевой обработки, что приводит к увеличению себестоимости изделия [1–3].

Для получения сложнопрофильных поверхностей широко применяется копировально-прошивная электроэрозионная обработка (КПЭЭО). КПЭЭО позволяет получать профиль изделий различной формы с минимальными затратами на инструмент и оснастку. Технологические переходы не требуют применения специальной оснастки в связи с отсутствием сил резания в процессе КПЭЭО [4–7].

Эффективность КПЭЭО зависит от качества электрода-инструмента (ЭИ). В современном производстве сложнопрофильные ЭИ изготавливают механическими способами обработки (токарная, фрезерная обработка). Необходимый контур поверхности зачастую требует ЭИ, который невозможно изготовить трехосевой обработкой, тогда изготавливают ЭИ на пятиосевых обрабатывающих центрах с применением специальной оснастки и режущего инструмента. Эти методы изготовления ЭИ требуют значительных экономических и временных затрат. В рамках массового производства использовать их нецелесообразно. Для опытного производства характерно изготовление одного контрольного образца для внесения последующих изменений в его конструкцию, чтобы минимизировать производственный цикл с целью обеспечения необходимого результата.

Актуальным решением является изготовление сложнопрофильных ЭИ с применением технологии литья по выплавляемым моделям и получением мастер-модели по методу быстрого прототипирования. Технология быстрого прототипирования позволяет изготовить опытный образец ЭИ для оценки соответствия качества и быстрого корректирования модели изделия. Применение аддитивных технологий для получения мастер-модели позволяет изготавливать единичные ЭИ различного профиля в сжатые сроки. Современное оборудование, применяе-

мое в аддитивном производстве, позволяет за один производственный цикл изготовить партию ЭИ с различными профилями, что способствует снижению экономических затрат и уменьшению производственного цикла [8].

Анализ литературы [9–11] показал, что по технологии быстрого прототипирования из жидких фотополимеров возможно изготавливать прототипы изделий с минимальными отклонениями и структурными дефектами. Применение данной технологии позволяет обеспечить нужные параметры повторяемой геометрии сложнопрофильных элементов. В работах [12–16] отмечается эффективность указанной технологии для получения требуемых сложнопрофильных изделий. Однако в настоящее время не в полной мере изучен вопрос точности мастер-моделей, полученных методом стереолитографии.

Актуальной задачей является разработка научно обоснованных подходов к изготовлению сложнопрофильных ЭИ по альтернативным технологиям.

Целью работы является обеспечение точности изготовления сложнопрофильных ЭИ методом литья с применением технологии быстрого прототипирования для копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Задачи:

- 1) разработать методику проектирования и производства сложнопрофильного ЭИ для КПЭЭО с применением технологии быстрого прототипирования для создания мастер-модели;
- 2) проанализировать отклонения формы мастер-модели, изготовленной из жидкого фотополимера, на координатно-измерительной машине (КИМ);
- 3) выполнить коррекцию CAD-модели для уменьшения отклонений формы мастер-модели;
- 4) разработать литниково-питательную систему (ЛПС) и оценить пористость отливки при заливке металлом;
- 5) провести экспериментальное исследование точности процесса КПЭЭО профильного паза электродом-инструментом, изготовленным литьем с получением выплавляемой модели по технологии быстрого прототипирования.

Методика исследований

Эксперименты проводились на базе ЦКП ЦАТ кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский нацио-

нальный исследовательский политехнический университет». В рамках исследования методом литья по выплавляемым моделям изготовлены пять образцов электродов-инструментов для КПЭО глухого профильного паза в изделиях специального назначения; эскиз ЭИ представлен на рис. 1. Электроды-инструменты спроектированы с учетом межэлектродного зазора (МЭЗ), рассчитанного по методике, представленной в работах [17, 18].

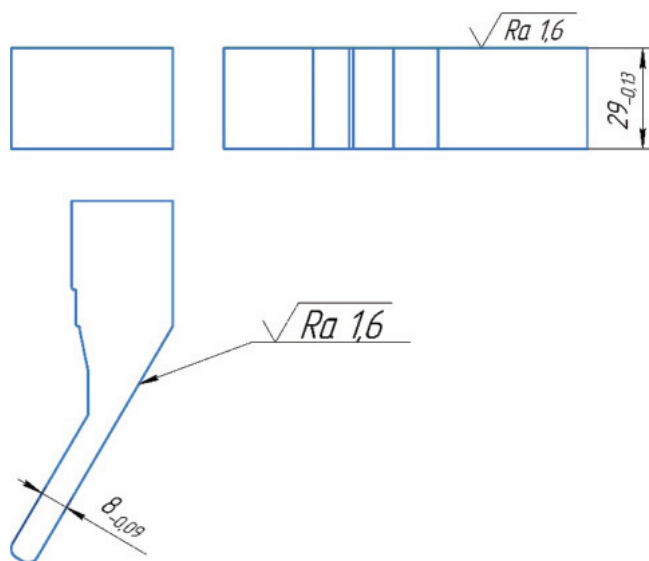


Рис. 1. Эскиз электрода-инструмента
Fig. 1. Sketch of the tool electrode

Проектирование CAD-модели с литниково-питательной системой осуществлялось в системе автоматизированного проектирования SOLIDWORKS.

Обработка CAD-модели для изготовления выплавляемой модели методом стереолитографии (SLA) осуществлена в программном комплексе Materialis Magics. Проектирование поддержек (рис. 2) необходимо для свободного удаления от рабочего места построения. Для минимизации расходов при изготовлении методом SLA выполнено внутреннее заполнение ЭИ ячеистой структурой гранецентрированной кубической решетки Вигнера – Зейтца (рис. 2). Данный тип решетки хорошо держит равноосную нагрузку, что позволяет получить мастер-модель с допустимыми отклонениями формы после дополимеризации материала на воздухе [19–21].

Выращивание ЭИ проведено на установке масочного типа Envisiontec Perfactory XEDE. Параметры режима представлены в табл. 1.

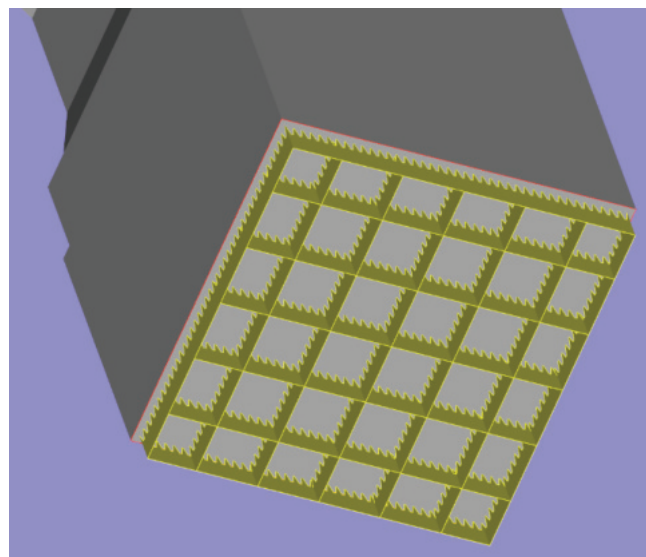


Рис. 2. Поддержки для ЭИ
Fig. 2. Supports for TE

Таблица 1
Table 1

Параметры режима выращивания
выплавляемой модели методом SLA
Parameters of the build mode of the investment
pattern by SLA method

Параметр	Значение
Толщина слоя, мкм	50
Высота поддержек, мм	3
Толщина поддержек, мкм	280
Время засветки сечения модели и поддержек, мс	8500

Для изготовления моделей использовался фотополимерный материал на основе крилатов – Si500, относящийся к классу сшитых полимеров. Характеристики материала при нормальных условиях представлены в табл. 2.

CAD-модель опытного ЭИ с литниково-питательной системой (ЛПС) представлена на рис. 3.

Для расчета ЛПС использован программный комплекс ProCast. При проектировании ЛПС необходимо учесть следующее:

- 1) одинаковые условия для каждого участка отливки при литье;
- 2) для толстостенных участков наличие дополнительного депо жидкого металла с целью устранения дефектов (усадочной раковины, рыхлости и пористости в металле);
- 3) направление горячего металла от толстостенных участков к тонкостенным.

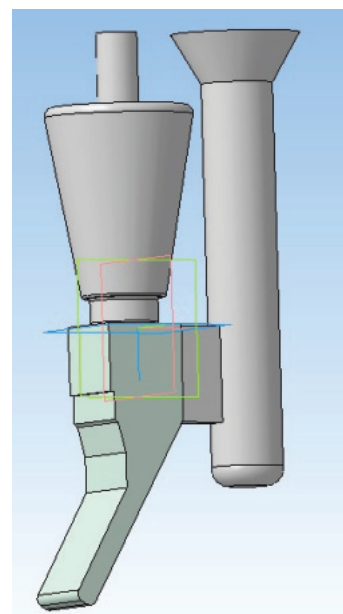
Таблица 2

Table 2

**Характеристики фотополимерного материала Si500
при нормальных условиях**
**Characteristics of Si500 photopolymer material under normal
conditions**

Параметр	Значение
Модуль упругости на растяжение E , МПа	2,68
Предел прочности на разрыв σ , МПа	78,1
Относительная деформация при разрыве ε , %	4,39
Предел прочности на изгиб σ , МПа	65
Температура стеклования T , °С	61
Плотность в жидком состоянии ρ , г/см ³	1,1
Плотность в твердом состоянии ρ , г/см ³	1,2

Рис. 3. Модель ЭИ с литниково-питательной системой
Fig. 3. TE model with sprue-feeding system



После изготовления мастер-модели для каждого ЭИ был сформирован модельный комплект ЛПС и литевая модель из литейного воска с помощью силиконовой формы.

Полученные восковые модели электродов были соединены с ЛПС. Восковые ЭИ с ЛПС затем устанавливались в опоку и заливались гипсом. Прокалка формы осуществлялась до температуры 750 °С. После остывания формы до температуры 450 °С проводилась прокалка моделей в индукционной тигельной печи, затем отливки извлекались из формы. Используемый материал изделия – литейная латунь ЛЦ40С.

Измерения параметров мастер-моделей, а также восковых моделей и последующих отли-

вок производились на трехкоординатной КИМ Contura Carl Zeiss G2. Рассматривались отклонения формы и величины возможных коррекций.

Исследуемые образцы устанавливались перпендикулярно плоскости стола, и с помощью активной сканирующей головки машины измерялись перемещения относительно сечения вертикальных и горизонтальных поверхностей прототипа. На каждом полученном ЭИ измерялось четыре поверхности. Измеряемые поверхности и стратегия измерения представлены на рис. 4.

Стратегия измерения представляет собой полилинию. Измерение производилось таким образом, чтобы максимальным образом задействовать всю поверхность. В результате собиралась

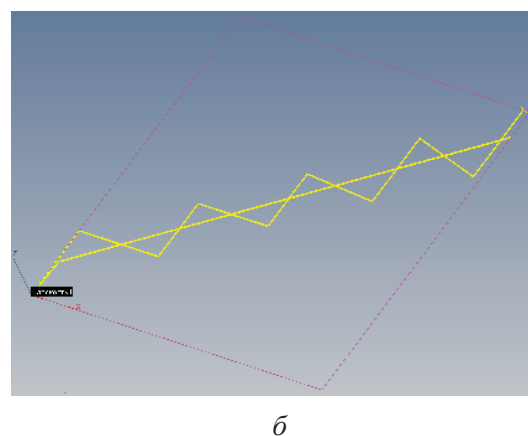
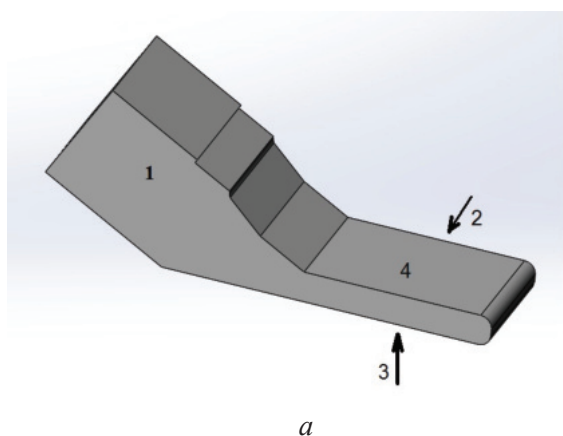


Рис. 4. Измеряемые поверхности электродов-инструментов (а) и траектория измерения ЭИ (б)

Fig. 4. Measured surfaces of the tool electrodes (a) and the trajectory of measuring the TE (b)

статистика из 200 точек в трех координатах – X , Y , Z .

Для тестирования полученных металлических ЭИ проведен эксперимент по КПЭЭО стали 45. Обработка выполнялась на КПЭЭО-станке Smart CNC в среде индустриального масла марки И-20а ГОСТ 982–80.

Режим КПЭЭО представлен в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Режим обработки на копировально-прошивном электроэрозионном станке

Machining mode on the copy-piercing EDM machine

Параметры	Значения
	max
I , А	8
U , В	50
T_{on} , мкс	100

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 представлена ячеистая структура внутреннего заполнения выплавляемых моделей.

С помощью программного комплекса Calypso показаны средние отклонения от плоскостности на поверхностях 1–4 (рис. 6) всех пяти образцов ЭИ. Для моделирования линии погрешности отклонения от плоскостности применен метод аппроксимации.

Для визуализации сделана выборка данных в количестве двенадцати точек для каждой поверхности. Точки выбирались на линии измерения, где она ломается.

Данные выборки для каждой поверхности представлены в табл. 4.

Расположение указанных точек представлено на рис. 7. Через эти точки проведена линия аппроксимации, обозначающая средний фактический размер мастер-моделей.

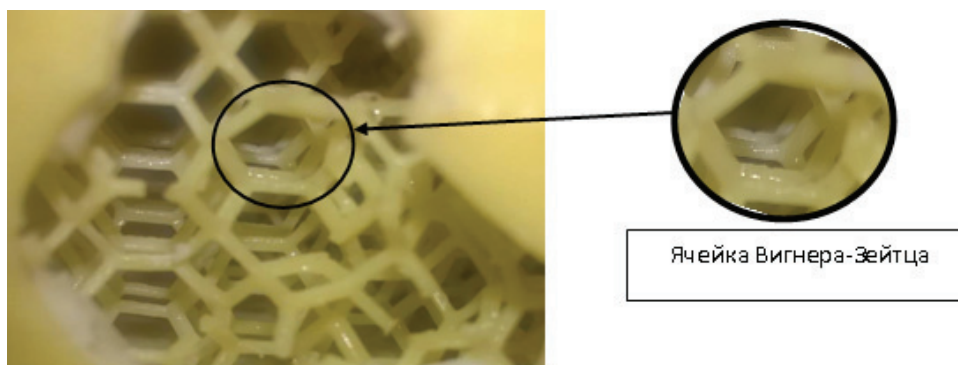


Рис. 5. Заполнение ячейками структурой гранцентрированной кубической решетки Вигнера – Зейтца

Fig. 5. Cell filling with the structure of a face-centered Wigner-Seitz cubic lattice

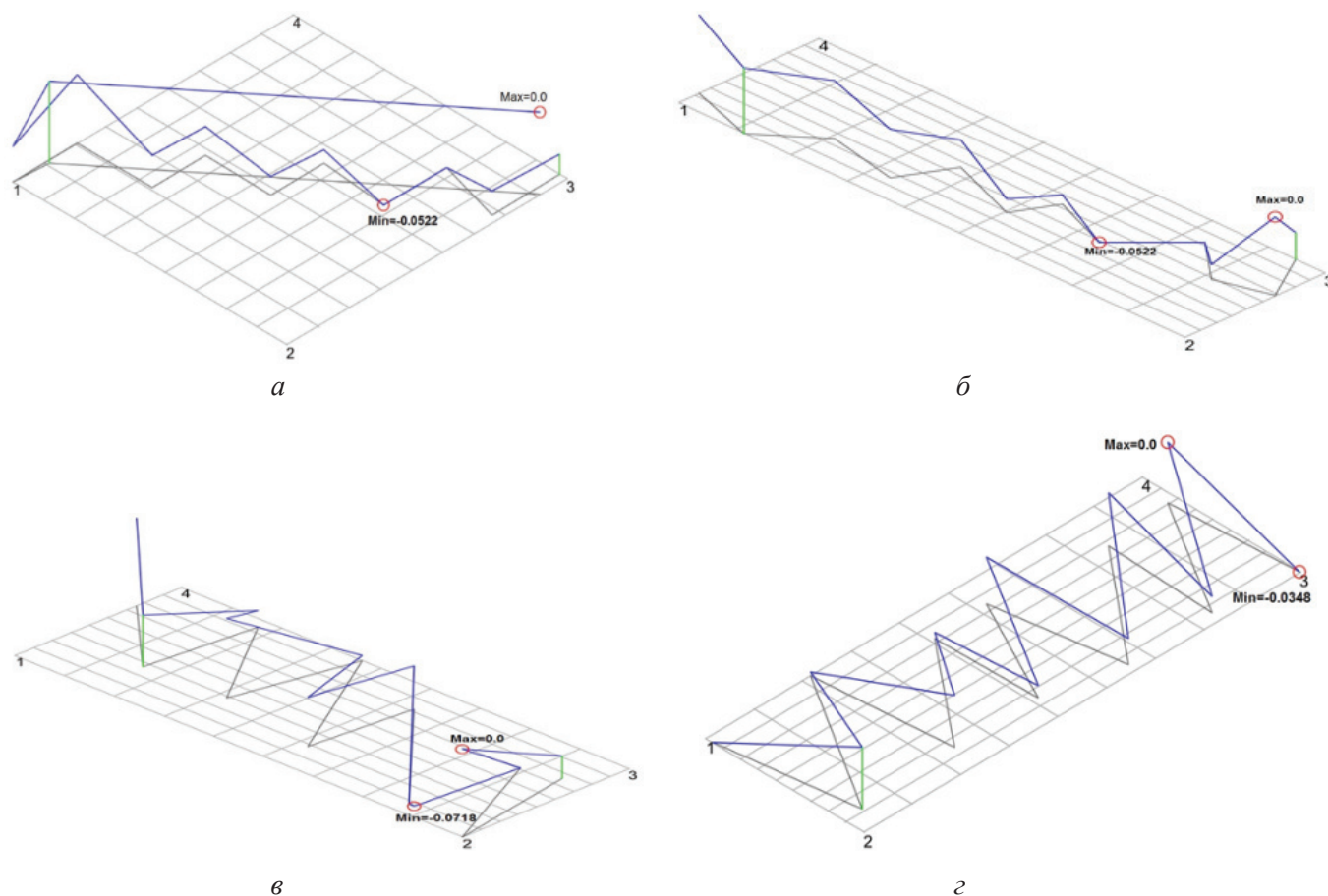


Рис. 6. Траектория измерения со значением среднего отклонения от плоскости по поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 6. Measurement trajectory with the value of average flatness deviation along the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Таблица 4

Table 4

Выборка точек с поверхностями 1–4
Sampling points from surface 1–4

Поверхность	Точка	Координаты точек на поверхности		
		X	Y	Z
1	1	264,2598	–513,1588	–477,3192
	2	264,2567	–518,4794	–477,3239
	3	259,5628	–517,3288	–477,2899
	4	259,5518	–521,9996	–477,2986
	5	255,7281	–520,0690	–477,2837
	6	255,7163	–525,1954	–477,2634
	7	250,7091	–523,9416	–477,2420
	8	250,6929	–529,7544	–477,2196
	9	244,3490	–528,7445	–477,1874
	10	244,3337	–534,6175	–477,1713
	11	237,7511	–536,6551	–477,1053
	12	267,6178	–513,1320	–477,3031

Поверхность	Точка	Координаты точек на поверхности		
		X	Y	Z
2	1	266,8592	–536,3874	–477,330
	2	266,8582	–539,1545	–477,2888
	3	262,9658	–539,3621	–477,3156
	4	258,9135	–542,0315	–477,2840
	5	254,9696	–539,4720	–477,2727
	6	250,3227	–541,9105	–477,2169
	7	245,5120	–543,7889	–477,1600
	8	237,8660	–544,3309	–477,1061
	9	230,9308	–544,0254	–477,0633
	10	227,6826	–544,4671	–477,0632
	11	234,7477	–544,6761	–477,0746
	12	236,7347	–543,6066	–477,0987
3	1	268,8741	–517,3798	–479,1381
	2	268,7148	–517,5176	–488,4096
	3	266,4900	–519,2954	–481,6966
	4	266,5182	–519,2315	–489,1544
	5	262,5285	–522,4333	–481,4241
	6	262,0909	–522,7745	–489,2207
	7	259,3579	–524,9424	–484,7519
	8	258,9885	–525,2224	–489,5129
	9	252,9817	–529,9868	–481,4362
	10	254,9560	–528,4201	–48,5392
	11	249,1152	–533,0230	–482,6272
	12	242,8281	–538,0595	–489,9179
4	1	264,0658	–510,4802	–481,0604
	2	263,1891	–511,1592	–490,5512
	3	260,0128	–513,6948	–481,1179
	4	258,2810	–515,0385	–488,8638
	5	253,7875	–518,5229	–482,0872
	6	253,1226	–519,1440	–490,6190
	7	249,1201	–522,2798	–481,9732
	8	249,2972	–522,1993	–491,0848
	9	245,1400	–525,4132	–481,5228
	10	242,5907	–527,4970	–491,0312
	11	237,5517	–531,5133	–490,5426
	12	236,7127	–532,0627	–481,5488

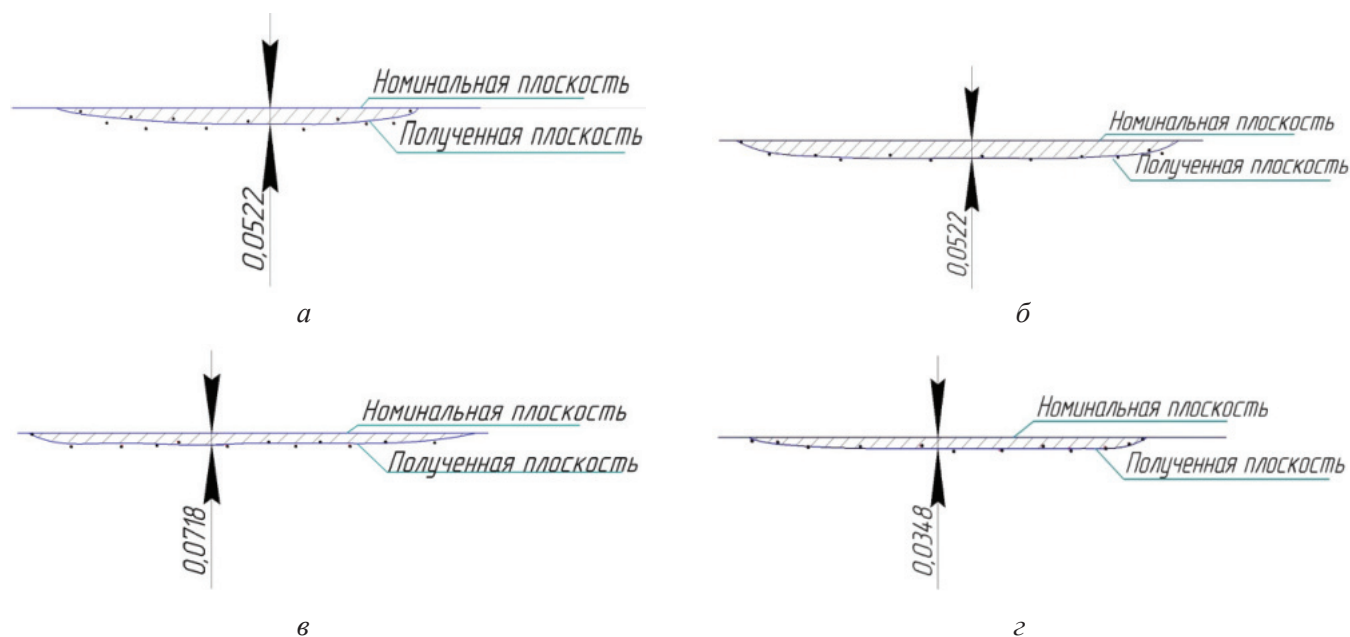


Рис. 7. Среднее отклонение от плоскостности на поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 7. Average flatness deviation on the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

В табл. 5 представлены отклонения образцов от плоскостности всех измеряемых поверхностей и усредненное значение. Необходимо учитывать эти отклонения и вносить их в исходную CAD-модель для создания новой геометрии детали.

Для устранения получившегося отклонения рассчитан новый размер, компенсирующий отклонение формы и равный среднему размеру отклонения от плоскостности. На рис. 8 представлены изменения геометрии формы детали на поверхностях 1–4.

Рассчитанные номинальные размеры внесены в CAD-модель (рис. 9), и создана новая геометрия поверхностей 1–4.

После внесения изменений повторно выращены мастер-модели в исходном режиме. Мастер-модели выращивались вертикально. Поддержки располагаются на нерабочей части электрода. Проведены повторные измерения отклонений от плоскостности всех поверхностей мастер-моделей. В табл. 6 представлены повторные измерения моделей ЭИ.

Анализ полученных данных показывает уменьшение среднего отклонения выращивания мастер-моделей на 25 % первой, второй и третьей поверхности. Отклонение от плоскостности поверхности 4 снизилось на 11,5 % в связи с меньшей площадью поверхности и меньшим углом ее расположения по отношению к столу.

Таблица 5

Table 5

Отклонения от плоскостности (мм)
Flatness deviation (mm)

№ Образца	Поверхности			
	1	2	3	4
1	0,0517	0,0512	0,0715	0,0346
2	0,0528	0,0519	0,0717	0,0341
3	0,0523	0,0519	0,0720	0,0352
4	0,0521	0,0529	0,0710	0,0351
5	0,0521	0,0530	0,0724	0,0351
Среднее значение	0,0522	0,0522	0,0718	0,0348

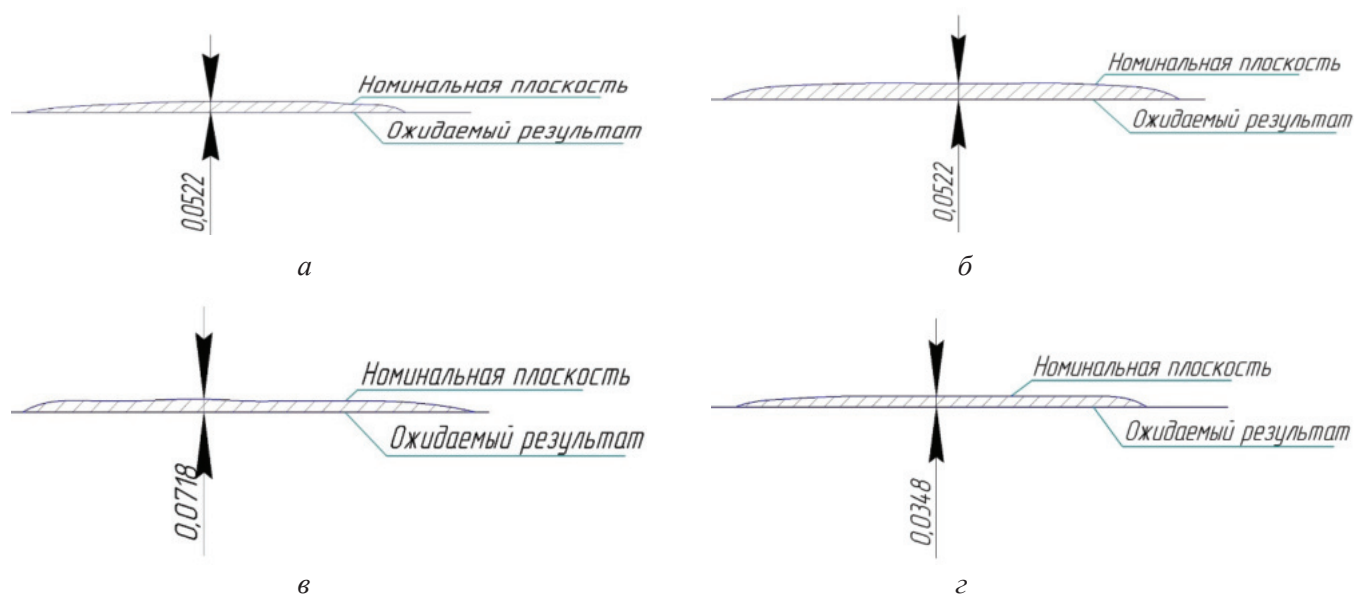


Рис. 8. Предполагаемая геометрия формы на поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 8. Assumed geometry of the shape on the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

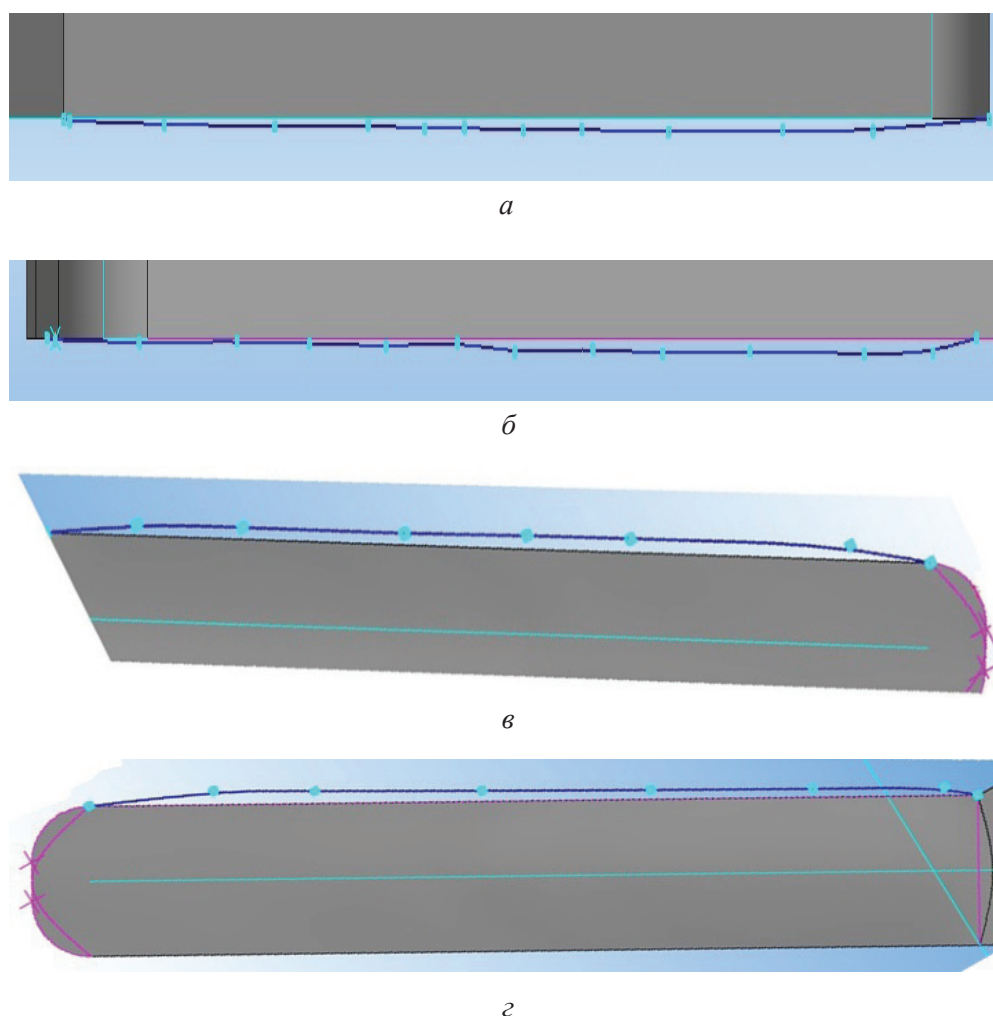


Рис. 9. Измененная геометрия формы с учетом выполненных расчетов на поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 9. Modified geometry of the mold taking into account the performed calculations on the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Таблица 6

Table 6

Измерения моделей ЭИ после повторного выращивания

Measurements of TE models after re-build

№ ЭИ	Поверхности			
	1	2	3	4
1	0,0388	0,0400	0,0539	0,0301
2	0,0394	0,0382	0,0549	0,0305
3	0,0394	0,0395	0,0538	0,0309
4	0,0397	0,0399	0,0530	0,0311
5	0,0387	0,0385	0,0538	0,0314
Среднее значение	0,0392	0,0392	0,0539	0,0308

При изготовлении отливки через щелевидный питатель форма заполняется расплавом. При поступлении расплава в тонкие места отливки происходит выравнивание скорости охлаждения, благодаря чему осуществляется удаление газа из отливки. Обеспечивается отсутствие усадочных пор в теле отливки ЭИ.

Распределение пор в прибыли и литниковой системе, рассчитанное в ПО ProCAST, представлено на рис. 10. На всю модель приходится примерно 13 % пористости. Установлено, что дефект не затрагивает ответственную часть отливки детали, это повышает качество поверхности и плотность металла. Программа производит

расчеты в идеальных условиях. Фактические результаты могут отличаться от произведенных расчетов.

На основе проведенного расчета доказана корректность спроектированной отливки и ЛПС.

На рис. 11, а представлена мастер-модель после корректировки; восковая модель представлена на рис. 11, б. На рис. 11, в показана металлическая отливка с ЛПС, которая отделяется от детали отрезным резцом. Металлический ЭИ с закреплением и ответный профиль паза, обработанный методом копировально-прошивной электроэрозионной обработки полученным металлическим ЭИ, представлены на рис. 11, г–е.

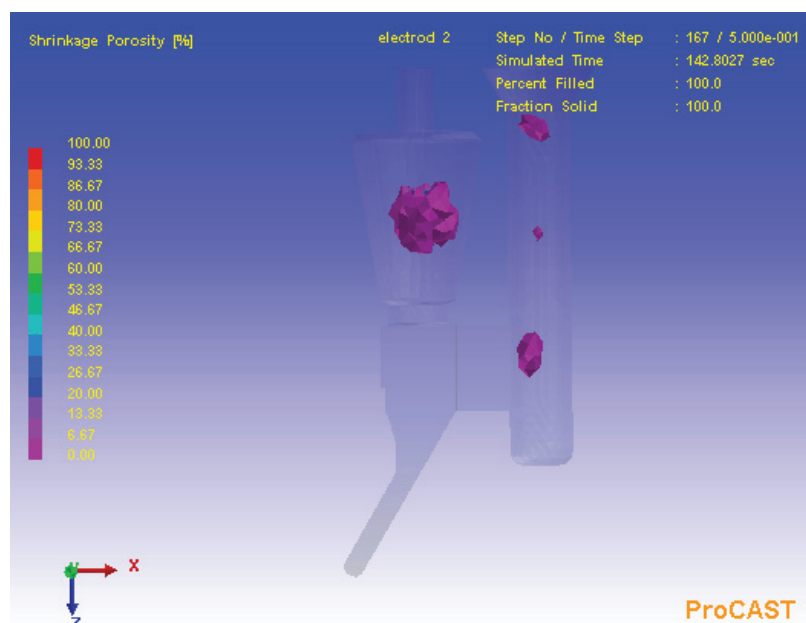


Рис. 10. Распределение пористости в теле отливки детали

Fig. 10. Porosity distribution in the body of the part casting



Рис. 11. Технологический процесс изготовления ЭИ:

a – мастер-модель; *б* – восковая модель; *в* – металлическая отливка с ЛПС; *г* – ЭИ; *д* – ЭИ с закреплением; *е* – ответный профиль поверхности паза после КПЭЭО

Fig. 11. Technological process of TE manufacturing:

a – master model; *б* – wax model; *в* – metal casting with SFS; *г* – TE; *д* – TE with fixing; *е* – mating profile of groove surface after CPEDM

В ходе эксперимента получены мастер-модель, восковая модель и металлическая отливка. В табл. 7 собраны заданные размеры и шероховатость CAD-модели, а также данные, полученные измерением металлической отливки.

Полученные размеры и шероховатость металлической отливки удовлетворяют заданным параметрам.

По результатам экспериментального исследования применения ЭИ, изготовленного по технологии литья с применением метода быстрого прототипирования для получения ма-

стер-модели, качество поверхности профильного паза удовлетворяет требованиям чертежа. Учетный межэлектродный зазор (МЭЗ) позволяет обеспечить размеры в пределах 12-го качества, что соответствует требованиям опытного производства.

Выводы

Разработана методика проектирования и изготовления сложнопровильного ЭИ с применением технологии быстрого прототипирования

Сравнительная таблица результатов измерения
Comparative table of measurement results

Объект	Размеры (мм)		Шероховатость (мкм)	
	Стороны 1–2	Стороны 3–4	Стороны 1–2	Стороны 3–4
CAD-модель	29 _{-0,13}	8 _{-0,09}	Ra 1,6	Ra 1,6
Металлическая отливка	28,90	7,98	Ra 1,6	Ra 1,6

для копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Анализ отклонения формы показал, что при изготовлении мастер-модели методом стереолитографии происходит возникновение погрешностей.

Экспериментальное исследование отклонения формы мастер-модели показало вогнутость поверхности в диапазоне от 0,03 до 0,07 мм в зависимости от расположения сторон.

Показано, что оптимизированная мастер-модель имеет на 25 % меньше отклонений формы.

Для изготовления ЭИ по технологии литья разработана литниково-питательная система. При оценивании пористости установлено, что поры сконцентрированы в ЛПС и прибыли, что положительно влияет на качество отливки.

Изготовление электрода-инструмента с помощью технологии литья показало, что все параметры точности и шероховатости ЭИ находятся в заданном допуске и соответствуют исходным данным чертежа.

Проведено экспериментальное исследование процесса электроэрозионной обработки профильного паза электродом-инструментом, который был изготовлен методом литья по выплавляемой модели, полученной с применением технологии быстрого прототипирования. Установлено, что размеры полученного паза удовлетворяют заявленным требованиям.

Список литературы

1. Predictive model of milling force for complex profile milling / X. Su, G. Wang, J. Yu, F. Jiang, J. Li, Y. Rong // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 87. – P. 1653–1662. – DOI: 10.1007/s00170-016-8589-1.

2. Additive manufacturing of Nickel-based superalloy: optimization of surface roughness using integrated high-speed milling / D. Sommer, A. Safi, C. Esen, R. Hellmann // *Proceedings of SPIE*. – 2024. – Vol. 12876: Laser 3D Manufacturing XI. – DOI: 10.1117/12.3000972.

3. Influence of the sphero-cylindrical tool orientation angles on roughness under processing complex-profile surfaces / M.R. Gimadeev, A.V. Nikitenko, V.O. Berkun // *Advanced Engineering Research*. – 2023. – Vol. 23 (3). – P. 231–240. – DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.

4. Ho K.H., Newman S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (13). – P. 1287–1300. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.

5. Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J. Micro electrical discharge machining of micro-hole // *Advanced Science Engineering and Medicine*. – 2020. – Vol. 12 (11). – P. 1335–1339. – DOI: 10.1166/ase.2020.2586.

6. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 6 (2). – P. 13–26. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.

7. Rathod R., Kamble D., Ambhore N. Performance evaluation of electric discharge machining of titanium alloy – a review // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2022. – Vol. 69 (1). – P. 1–19. – DOI: 10.1186/s44147-022-00118-z.

8. Melchels F.P.W., Feijen J., Grijpma D.W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering // *Biomaterials*. – 2010. – Vol. 31. – P. 6121–6130. – DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.

9. Continuous liquid interface production of 3D objects / J.R. Tumbleston, D. Shirvanyants, N. Ermoshkin, R. Januszewicz, A.R. Johnson, D. Kelly, K. Chen, R. Pinschmidt, J.P. Rolland, A. Ermoshkin, E.T. Samulski, J.M. DeSimone // *Science*. – 2015. – Vol. 6228 (347). – P. 1349–1352. – DOI: 10.1126/science.aaa2397.

10. One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures / M. Shusteff, A.E.M. Browar, B.E. Kelly, J. Henriksson, T.H. Weisgraber, R.M. Panas, N.X. Fang, C.M. Spadaccini // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3 (12). – P. 1–7. – DOI: 10.1126/sciadv.aao5496.
11. Layerless fabrication with continuous liquid interface production / R. Januszewicz, J.R. Tumbleston, A.L. Quintanilla, S.J. Mecham, J.M. DeSimone // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 113 (42). – P. 1–6. – DOI: 10.1073/pnas.1605271113.
12. Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control / D. Han, C. Yang, N.X. Fang, H. Lee // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 27 (17). – P. 606–615. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.031.
13. Jigang H., Qin Q., Jie W. A review of stereolithography: processes and systems // *Processes*. – 2020. – Vol. 8 (9). – P. 1–16. – DOI: 10.3390/pr8091138.
14. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing / S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt // *Chemical Reviews*. – 2017. – Vol. 117 (15). – DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
15. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities // *Dental Materials*. – 2016. – Vol. 32 (1). – P. 54–64. – DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018.
16. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui // *Composites, Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 110. – P. 442–458. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
17. Golabczak A., Konstantynowicz A., Golabczak M. Mathematical modelling of the physical phenomena in the interelectrode gap of the EDM process by means of cellular automata and field distribution equations // *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures*. – Cham: Springer, 2013. – P. 169–184. – DOI: 10.1007/978-3-319-00506-5_11.
18. Quantitative analysis of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process / A. Kumar, A. Mandal, A.R. Dixit, D.K. Mandal // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 4 (1). – P. 1–11. – DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.
19. Using rapid prototyping technologies for creating implants with cellular structure / P.N. Kilina, V.P. Vasilyuk, E.A. Morozov, A.M. Khanov, L.D. Sirotenko // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. – 2015. – Vol. 12 (2). – P. 1691–1698. – DOI: 10.13005/bbra/1832.
20. Real-space wigner-seitz cells imaging of potassium on graphite via elastic atomic manipulation / F. Yin, P. Koskinen, S. Kulju, J. Akola, R.E. Palmer // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5 (1). – P. 1–5. – DOI: 10.1038/srep08276.
21. Cho Y., Lee I., Cho D.W. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography // *Microsystem Technologies*. – 2005. – Vol. 11 (2). – P. 158–167. – DOI: 10.1007/s00542-004-0468-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 -

Metal Working and Material Science

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



Manufacturing of tool electrodes with optimized configuration for copy-piercing electrical discharge machining by rapid prototyping method

Timur Ablyaz ^a, Vladimir Blokhin ^b, Evgeniy Shlykov ^{c, *}, Karim Muratov ^d, Ilya Osinnikov ^e

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>,  lowrider11-13-11@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>,  warkk98@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>,  Kruspert@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>,  Karimur_80@mail.ru;
^e  <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>,  ilyuhaosinnikov@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2024

Revised: 08 October 2024

Accepted: 17 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Rapid prototyping method

Master model

Precision

Stereolithography

Liquid photopolymer

Copy-and-pierce electrical discharge machining

Flatness deviation

Funding

The research was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01224, <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Associate Professor of the department. ITM Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education "Perm National Research Polytechnic University" Shumkov A.A. for assistance in obtaining and designing master models by the rapid prototyping method.

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the results of obtaining a complex-profile tool electrode (*TE*) for copy-and-pierce electrical discharge machining by casting technology. This method consists in using a master model by rapid prototyping method. **The purpose of the work:** experimental study of accuracy assurance in manufacturing of complex-profile *TE* by casting with the use of rapid prototyping technology for copy-piercing electrical discharge machining. **Research Methods.** The master model of *TE* was produced on the *Envisiontec Perfactory XEDE* machine using stereolithography technology. *Si500* photopolymer was used as a starting material. Intermediate and final surface deviation measurements were performed on a *Contura Carl Zeiss G2 CMM*. Calculation of the gutter and feed system was performed in *ProCast* software. A casting was obtained from casting brass *LC40S (Cu-40 Zn-Pb)*. The study of the process of copy-piercing electrical discharge machining of *TE* made by casting with the use of rapid prototyping technology was carried out with the help of *Smart CNC* copy-piercing machine in the environment of transformer oil. Operating parameters: pulse turn-on time (T_{on} , μ s), voltage (U , V), current (I , A). **Results and discussion.** The methodology of design and manufacturing of complex-profile *TE* with application of rapid prototyping technology for copy-piercing electrical discharge machining is developed. The analysis of shape deviation shows that errors occur during the manufacturing of the master model by stereolithography. An experimental study of the shape deviation of the master model shows surface concavity in the range of 0.03 to 0.07 mm depending on the arrangement of the sides. It is shown that the optimized master model has 25 % less shape deviation. A sprue-feeding system (*SFS*) is developed for the fabrication of *TE* by casting technology. When porosity is evaluated, it is found that pores are concentrated in the *SFS* and riser, which positively affects the quality of the casting. Manufacturing of the tool electrode with the help of casting technology showed that all accuracy and roughness parameters are within the specified tolerance and correspond to the initial drawing data. Experimental study of the process of electroerosion machining of the profile groove of the *TE* manufactured by casting on the investment casting model obtained with the use of rapid prototyping technology is carried out. It is established that the dimensions of the obtained groove meet the stated requirements.

For citation: Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Shlykov E.S., Muratov K.R., Osinnikov I.V. Manufacturing of tool electrodes with optimized configuration for copy-piercing electrical discharge machining by rapid prototyping method. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 138–152. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-138-152. (In Russian).

References

1. Su X., Wang G., Yu J., Jiang F., Li J., Rong Y. Predictive model of milling force for complex profile milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, pp. 1653–1662. DOI: 10.1007/s00170-016-8589-1.

* Corresponding author

Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University,
 29 Komsomolsky prospekt,
 614990, Perm, Russian Federation
 Tel.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

2. Sommer D., Safi A., Esen C., Hellmann R. Additive manufacturing of Nickel-based superalloy: optimization of surface roughness using integrated high-speed milling. *Proceedings of SPIE*, 2024, vol. 12876. *Laser 3D Manufacturing XI*. DOI: 10.1117/12.3000972.
3. Gimadeev M.R., Nikitenko A.V., Berkun V.O. Influence of the sphero-cylindrical tool orientation angles on roughness under processing complex-profile surfaces. *Advanced Engineering Research*, 2023, vol. 23 (3), pp. 231–240. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.
4. Ho K.H., Newman S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43 (13), pp. 1287–1300. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
5. Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J. Micro electrical discharge machining of micro-hole. *Advanced Science Engineering and Medicine*, 2020, vol. 12 (11), pp. 1335–1339. DOI: 10.1166/ase.2020.2586.
6. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6 (2), pp. 13–26. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.
7. Rathod R., Kamble D., Ambhore N. Performance evaluation of electric discharge machining of titanium alloy – a review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2022, vol. 69 (1), pp. 1–19. DOI: 10.1186/s44147-022-00118-z.
8. Melchels F.P.W., Feijen J., Grijpma D.W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 2010, vol. 31, pp. 6121–6130. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
9. Tumbleston J.R., Shirvanyants D., Ermoshkin N., Januszewicz R., Johnson A.R., Kelly D., Chen K., Pinschmidt R., Rolland J.P., Ermoshkin A., Samulski E.T., DeSimone J.M. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 2015, vol. 6228 (347), pp. 1349–1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397.
10. Shusteff M., Browar A.E.M., Kelly B.E., Henriksson J., Weisgraber T.H., Panas R.M., Fang N.X., Spadaccini C.M. One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures. *Science Advances*, 2017, vol. 3 (12), pp. 1–7. DOI: 10.1126/sciadv.aao5496.
11. Januszewicz R., Tumbleston J.R., Quintanilla A.L., Mechama S.J., DeSimone J.M. Layerless fabrication with continuous liquid interface production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113 (42), pp. 1–6. DOI: 10.1073/pnas.1605271113.
12. Han D., Yang C., Fang N.X., Lee H. Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27 (17), pp. 606–615. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.031.
13. Jigang H., Qin Q., Jie W. A review of stereolithography: processes and systems. *Processes*, 2020, vol. 8 (9), pp. 1–16. DOI: 10.3390/pr8091138.
14. Ligon S.C., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mülhaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, 2017, vol. 117 (15). DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
15. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 2016, vol. 32 (1), pp. 54–64. DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018.
16. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Composites, Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 442–458. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
17. Golabczak A., Konstantynowicz A., Golabczak M. Mathematical modelling of the physical phenomena in the interelectrode gap of the EDM process by means of cellular automata and field distribution equations. *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures*. Cham, Springer, 2013, pp. 169–184. DOI: 10.1007/978-3-319-00506-5_11.
18. Kumar A., Mandal A., Dixit A.R., Mandal D.K. Quantitative analysis of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 4 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.
19. Kilina P.N., Vasilyuk V.P., Morozov E.A., Khanov A.M., Sirotenko L.D. Using rapid prototyping technologies for creating implants with cellular structure. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2015, vol. 12 (2), pp. 1691–1698. DOI: 10.13005/bbra/1832.
20. Yin F., Koskinen P., Kulju S., Akola J., Palmer R.E. Real-space wigner-seitz cells imaging of potassium on graphite via elastic atomic manipulation. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5 (1), pp. 1–5. DOI: 10.1038/srep08276.
21. Cho Y., Lee I., Cho D.W. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography. *Microsystem Technologies*, 2005, vol. 11 (2), pp. 158–167. DOI: 10.1007/s00542-004-0468-2.

Conflicts of Interest

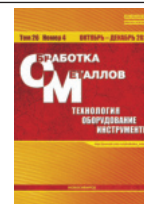
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Обзор исследований высокоэнтروпийных сплавов, их свойств, методов создания и применения

Анна Шуберт ^{a, *}, Сергей Коновалов ^b, Ирина Панченко ^c

Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-7355-2955>,  shubert-anna@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>,  konovalov@sibsiu.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>,  i.r.i.ss@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 21 апреля 2024

Рецензирование: 17 мая 2024

Принята к печати: 17 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Высокоэнтропийные сплавы

Износостойкость

Жаропрочность

Термоустойчивость

Пластичность

Усталостные свойства

Легирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются перспективы изучения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) – металлических материалов с уникальными свойствами. Изучение высокоэнтропийных сплавов актуально в связи с их свойствами, экологической устойчивостью, экономической выгодой и технологическим потенциалом. ВЭС представляют интерес для исследователей благодаря их стабильности, прочности, коррозионной стойкости и другим характеристикам, что делает их перспективными для использования в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, медицине и микроэлектронике. Таким образом, исследование ВЭС способствует развитию новых материалов и технологическому прогрессу, обеспечивая возможности для создания инновационных продуктов и совершенствования существующих решений. Для эффективного использования потенциала высокоэнтропийных сплавов требуются исследования в ряде направлений. Во-первых, необходимо улучшить технологию производства таких сплавов и разработать новые способы их получения с улучшенными характеристиками и сниженной стоимостью. Во-вторых, требуется установить основные принципы работы высокоэнтропийных сплавов и изучить механизмы, оказывающие влияние на их свойства. Следует также разработать новые сплавы с заданными свойствами, провести эксперименты и компьютерное моделирование для оптимизации характеристик сплавов и определения наилучших составов. **Цель работы:** обзор последних достижений в области высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), их свойств, методов создания и применения, а также определение наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований. **Методами исследования** являются обзор и анализ на основании разработок преимущественно 2020–2024 гг., которые были выполнены отечественными и зарубежными учеными. В статье обсуждаются перспективы исследования высокоэнтропийных сплавов – материалов, имеющих широкий спектр применения в различных отраслях промышленности. В работе приводятся результаты исследований, проведенных преимущественно в 2020–2024 гг. Описываются основные свойства высокоэнтропийных сплавов, такие как высокая прочность, коррозионная стойкость, усталостные свойства сплавов, пластичность и деформируемость, термоустойчивость, электропроводящие и магнитные свойства, а также возможность создания сплавов с заданными характеристиками. Выявлены самые распространенные методы изменения свойств сплавов. Рассматриваются направления дальнейшего развития исследований в этой области. **Результаты и обсуждение.** Обзор литературы показывает, что наиболее перспективным направлением для дальнейшего изучения можно считать электропроводящие и магнитные свойства высокоэнтропийных сплавов. Это направление открывает значительные возможности для разработки новых энергосберегающих технологий, высокоэффективных сенсоров и магнитных материалов, что может привести к существенным инновациям в таких областях, как электроника, энергетика и информационные технологии. Исходя из проведенного анализа можно заключить, что высокоэнтропийные сплавы представляют собой перспективный класс материалов с широким спектром потенциальных применений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение границ знаний в области составов, методов и свойств ВЭС, а также на разработку новых материалов с улучшенными характеристиками, что откроет новые горизонты для инноваций в различных технологических секторах.

Для цитирования: Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Обзор исследований высокоэнтропийных сплавов, их свойств, методов создания и применения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 153–179. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-153-179.

Введение

Изучение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) началось в относительно недавнее время, в начале XXI века. Их исследование связано с интересом к созданию новых материалов с не-

обычными свойствами и потенциалом для различных применений.

Высокоэнтропийные сплавы были предложены и исследованы в начале 2000-х годов группой ученых под руководством профессора Юнду Ли (Yeh J.W.) из Национального центра эксельсиорского университета Тайваня. Они опубликовали свои исследования в журналах в 2004 г. [1].

Высокоэнтропийные сплавы (High-Entropy Alloys, HEAs) представляют собой класс материалов, в которых пять или более различных

*Адрес для переписки

Шуберт Анна Владиславовна, аспирант
Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42,
654007, г. Новокузнецк, Россия
Тел.: +7 913 437-89-70, e-mail: shubert-anna@mail.ru

элементов смешиваются в равных или близких пропорциях [2]. Это открывает возможность формирования новых типов кристаллических структур и фаз, включая необычные кристаллические структуры, аморфные области и другие формы организации атомов, которые могут обладать уникальными свойствами. Современные исследования показывают, что в высокоэнтروпийных сплавах возможно образование структур и фаз, которые ранее не были обнаружены или не были хорошо изучены. Это расширяет традиционные представления о возможностях данного класса материалов.

Первые высокоэнтропийные сплавы были созданы путем плавления и смешивания элементов в соответствующих пропорциях, а затем охлаждения расплава до получения сплава. Это отличает их от традиционных сплавов, где обычно преобладает один или два основных элемента.

Высокоэнтропийные сплавы характеризуются высокой энтропией конфигурации атомов, обусловленной равномерным распределением пяти или более различных элементов в их структуре. Ранее считалось, что формирование однофазной структуры и равное присутствие элементов являются обязательными условиями, но современная концепция высокоэнтропийных сплавов продолжает эволюционировать. Введение элементов в равных пропорциях и формирование однофазной структуры больше не рассматривается как обязательное требование, что открывает новые перспективы и возможности для дальнейших исследований в этой области.

Сплавы могут обладать выдающимися механическими свойствами, такими как высокая прочность, твердость и устойчивость к износу. Это делает их полезными для создания легких, но прочных материалов для авиации, автомобилестроения и других отраслей. Некоторые ВЭС могут быть стойкими к агрессивным окружающим средам, что делает их подходящими для применения в условиях, где материалы должны сохранять свои свойства в течение длительного времени. Из-за своей составной природы ВЭС могут быть более доступными и экономически эффективными в производстве по сравнению с традиционными сплавами.

За последние десятилетия интерес к сплавам, разработанным на основе энтропийного подхода, заметно вырос, что объясняется перспективой ВЭС. За рубежом идея высокоэнтропийных сплавов была предложена в начале 2000-х гг., в России же исследования высокоэнтропийных сплавов начались чуть позже. Первые публикации и исследования российских ученых в этой области появились в конце 2000-х гг. и начале 2010-х гг. К 2010 г. российские исследователи уже активно занимались изучением ВЭС, публиковали статьи и участвовали в международных конференциях.

Исследователей особенно волнует потенциал открытия у металлов свойств, которые не присущи обычным материалам. Это может включать в себя новые формы магнитных или электрических свойств, суперпластичность, уникальную стабильность при высоких температурах и другие характеристики, которые не только преодолевают ограничения традиционных материалов, но и открывают двери для создания совершенно новых технологий и инновационных применений. Эти открытия могут стать ключом к разработке более эффективных и прогрессивных материалов, которые будут использоваться в широком спектре отраслей, от энергетики до медицины.

Однако следует отметить, что исследования в области высокоэнтропийных сплавов все еще находятся на начальном этапе, и требуются дополнительное исследование и разработка, чтобы полностью раскрыть их потенциал и определить конкретные области применения.

Целью данной работы является обзор последних достижений в области высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), их свойств, методов создания и применения, а также определение наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований.

Задачи исследования:

- 1) осуществить обзор современных методов получения ВЭС;
- 2) исследовать влияние легирующих элементов на свойства ВЭС;
- 3) оценить свойства покрытий на основе ВЭС;
- 4) изучить коррозионную стойкость ВЭС;
- 5) изучить термостойкость ВЭС;
- 6) исследовать прочностные и пластические свойства ВЭС;

7) изучить электропроводящие и магнитные свойства ВЭС;

8) определить перспективные области применения ВЭС.

Методика исследований

В статье рассмотрены результаты обзора литературы, посвященной высокоэнтропийным сплавам. Исследование проведено на основании разработок преимущественно за 2020–2024 гг., которые были выполнены отечественными и зарубежными учеными. Изучены методы получения ВЭС с целью определения наиболее преобладающего. Учитывая высокий интерес ученых как к антикоррозионным свойствам сплавов в целом, так и к свойствам покрытий в частности, наибольшая часть обзора посвящена именно этому вопросу. В исследовании также приведены работы по улучшению термоустойчивости, прочности, пластичности, электропроводности и магнитных свойств высокоэнтропийных сплавов.

Исходя из анализа статистических данных, полученных из междисциплинарной бесплатной научной базы данных Scilit, которая индексирует научные материалы, можно отметить значительный рост публикаций и исследований по высокоэнтропийным сплавам за последние несколько лет. Это свидетельствует о повышенном

интересе к данной теме и делает текущий период наиболее актуальным для проведения анализа в этой области. Анализ данных был проведен на момент августа 2024 г.

Более подробная динамика количества публикаций на тему «Высокоэнтропийные сплавы» проиллюстрирована с помощью графика на рис. 1, отображающего количество публикаций в зависимости от года выпуска.

Из представленных статистических данных видно, что исследования в области высокоэнтропийных сплавов переживают значительный рост за последние несколько лет. Начиная с 2004 г. количество публикаций по указанной теме постепенно увеличивалось, но наиболее заметный скачок произошел после 2015 г.

С 2015 по 2024 г. количество публикаций увеличилось более чем в 10 раз, что свидетельствует о растущем интересе к этой области исследований. Такой стремительный рост может быть обусловлен как расширением знаний в области высокоэнтропийных сплавов, так и повышенным вниманием к этой теме со стороны научного сообщества.

В настоящее время множество исследовательских групп по всему миру, включая США, Японию, Южную Корею, Китай и Европу, активно занимаются изучением высокоэнтропийных сплавов. Эти группы не только проводят фундаментальные исследования, но и разрабатывают

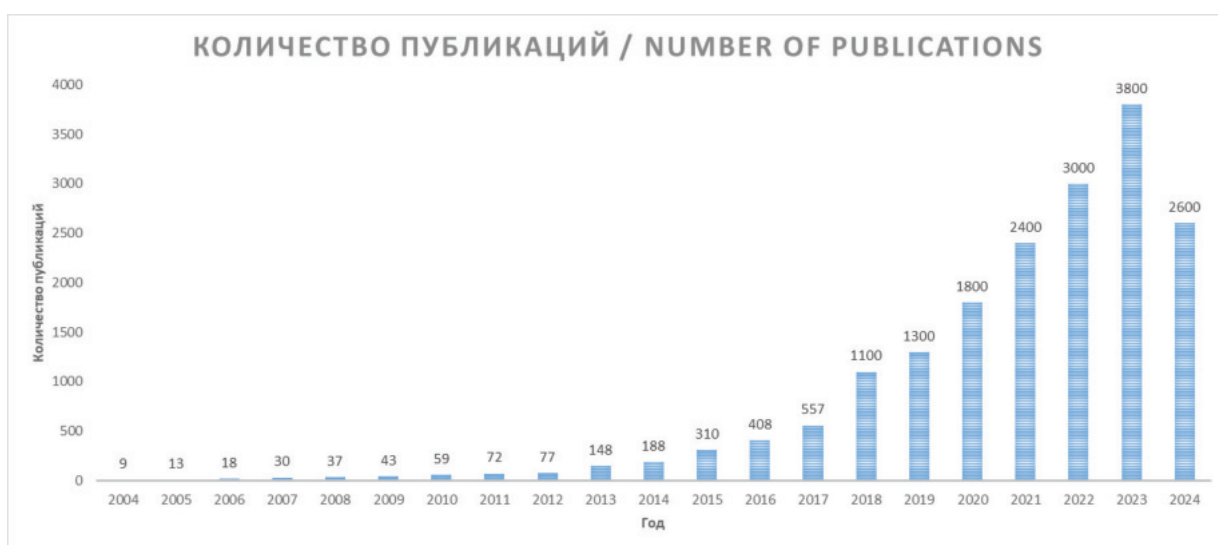


Рис. 1. Количество публикаций на тему «Высокоэнтропийные сплавы» в зависимости от года выпуска

Fig. 1. The number of publications on the topic “High-entropy alloys” depending on the year of publication

новые методы производства, улучшают свойства материалов и расширяют области их применения. Сотни ученых и инженеров по всему миру углубленно изучают эту область материаловедения.

На сегодняшний день около 100 стран принимают активное участие в разработке и изучении высокоэнтروпийных сплавов. Это свидетельствует о том, что данная область науки и техники привлекает внимание исследователей со всего мира, что способствует более глубокому пониманию и раскрытию потенциала рассматриваемых материалов. Для наглядной демонстрации географического разнообразия интереса к высокоэнтропийным сплавам на рис. 2 представлен список стран и количество публикаций, что позволяет оценить вклад каждой страны в эту область исследований.

Китай лидирует по количеству публикаций, значительно опережая остальные страны. США занимают второе место, однако их вклад существенно меньше. Далее следуют Индия, Германия и Япония, демонстрируя умеренную активность в этой области. Южная Корея и Россия

имеют сопоставимое количество публикаций. Великобритания, Франция и Австралия замыкают список. Приведенные данные указывают на высокую актуальность темы высокоэнтропийных сплавов в мировой научной среде с заметным лидерством Китая.

В настоящем обзоре приведены публикации из разных регионов, однако большая часть исследований выполнены на базе университетов и научных институтов Китая. Выбор исследования разработок зарубежных ученых, в частности из Китая, при изучении высокоэнтропийных сплавов за последние четыре года обусловлен несколькими факторами: Китай является одним из лидеров в области исследований и разработок высокоэнтропийных сплавов; в стране активно проводятся исследования в этой области, создаются новые сплавы и технологии их производства. Изучение зарубежных разработок позволяет оценить уровень развития науки в других странах, а также использовать их опыт и достижения для улучшения собственных исследований.

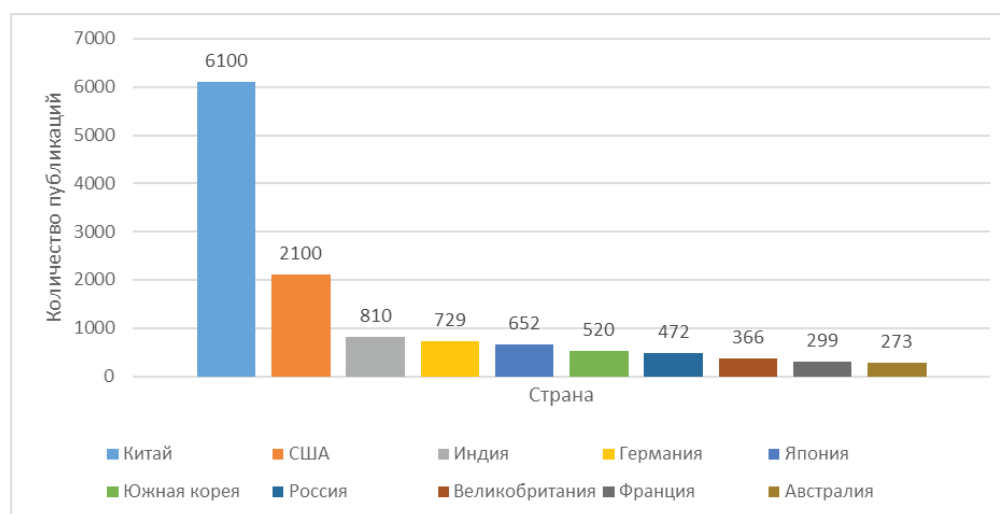


Рис. 2. Количество публикаций на тему «Высокоэнтропийные сплавы» в разных странах

Fig. 2. The number of publications on the topic “High-entropy alloys” in different regions

Результаты и их обсуждение

Методы получения высокоэнтропийных сплавов

Высокоэнтропийные сплавы можно получить несколькими способами. Могут быть использованы различные технические реше-

ния, связанные с процессами плавления, порошковой металлургии (механического легирования порошков), сварки, спиннингования, splat-охлаждения, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, магнетронного распыления мишеней, наплавки порошковых смесей на металлическую основу.

Самые первые ВЭС были получены в результате индукционной и дуговой плавки с последующим литьем [1, 2]. Этот процесс включал в себя плавление различных металлических компонентов сплава с использованием индукционной или дуговой печи, после чего расплавленный материал заливался в формы для создания желаемой формы и размера изделия.

Рогачев А.С. в своем исследовании [3] отмечает, что наиболее преобладающими методами получения ВЭС считают следующие:

- метод кристаллизации из расплавов;
- механическое сплавление в планетарных мельницах в сочетании с электроискровым плазменным спеканием;
- электроискровое плазменное спекание;
- синтез в режиме горения (СВС).

Помимо перечисленных методов, которые можно назвать классическими, в последние годы можно встретить и другие методы получения ВЭС.

Ученые State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials в своей работе рассмотрели все методы получения сплавов для покрытий и изучили свойства ВЭС. Ими было отмечено, что наиболее перспективным считается лазерно-аддитивный метод, который обладает высокой технологической точностью [4].

Метод лазерного аддитивного производства позволяет создавать сложные трехмерные структуры высокоэнтропийных сплавов прямо из порошков или проволоки. Лазерная плавка материала с высокой точностью и контролем параметров процесса позволяет получать сплавы с заданными микроструктурами и свойствами. В исследовании [5] был проведен обзор различных сплавов, полученных с помощью лазерного аддитивного производства. Отмечено, что данные сплавы отличаются быстрым проектированием и изготовлением, а также хорошими теплофизическими и механическими свойствами. В исследовании [6] был получен высокоэнтропийный сплав CrMnFeCoNi, обладающий выдающимися износостойкими и коррозионными свойствами, с помощью лазерного аддитивного производства и последующей лазерной ударной обработки. После лазерной обработки результаты показали значительное улучшение эксплуатационных свойств. В частности, коэффициент трения и скорость износа образцов значительно снизи-

лись. Например, высота царапин на поверхности необработанного образца колебалась от $-4,5$ до $4,2$ мкм, тогда как на образце, обработанном лазером с энергией 2 Дж, высота колебалась от $-4,2$ до $5,6$ мкм. При увеличении энергии лазера до 4 и 6 Дж на обработанных поверхностях наблюдались значительная колебательная рябь и более выраженные изменения микроструктуры.

Результаты испытаний на коррозию показали, что обработанные лазером образцы имели более низкую плотность коррозионного тока и более высокий коррозионный потенциал по сравнению с необработанными образцами, что указывает на улучшение коррозионной стойкости. В частности, у обработанных образцов наблюдалось снижение коррозионного тока до $0,1$ мкА/см² и повышение коррозионного потенциала до $-0,3$ В, что свидетельствует о формировании более плотных пассивных пленок, способных защитить материал от агрессивных ионов.

Основные выводы работы заключаются в том, что лазерное ударное упрочнение приводит к образованию слоя с повышенной микротвердостью и сжатием остаточного напряжения, который в свою очередь уменьшает износ и защищает материал от коррозии. Эти улучшения обусловлены утонением зерен и созданием остаточных напряжений сжатия, что способствует формированию более стойких пассивных пленок.

В недавнем исследовании, проведенном в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», обсуждается инновационный метод дуговой наплавки с использованием порошковой проволоки, который предлагает новый подход к изготовлению высокоэнтропийных сплавов. Метод включает в себя использование специально разработанных порошковых проволок и высококремнистого марганцевого флюса для наплавки; это позволяет избежать проблем, связанных с традиционными порошковыми методами. Исследование показало, что полученный металл состоит в основном из железа и легирующих элементов. Однако выявлены определенные проблемы, такие как наличие неметаллических включений и сравнительно низкая твердость по сравнению с эквивалентными высокоэнтропийными сплавами. Полученные результаты подчеркивают как потенциал, так и ограничения нового метода,

открывая перспективы для дальнейших исследований и улучшений в области высокоэнтропийных сплавов и их применения [7].

Легирование высокоэнтропийных сплавов

Одним из наиболее перспективных методов улучшения свойств ВЭС является легирование – процесс добавления различных элементов в основной состав сплава. Легирование открывает новые возможности для адаптации ВЭС под специфические требования различных отраслей промышленности.

Авторами будут рассмотрены различные свойства ВЭС, измененные методом легирования.

Легирование может оказывать значительное влияние на коррозионную стойкость высокоэнтропийных сплавов. Различные легирующие элементы могут по-разному взаимодействовать с окружающей средой и вызывать различные типы коррозии. В исследовании [8] было изучено влияние элемента Мо на микроструктуру, коррозионные свойства и состав пассивной пленки литого $\text{AlCrFeNi}_3\text{Mo}_x$, где $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. Сплав $\text{Mo}_{0,3}$ имеет скорость коррозии 0,0155 мм/год и обладает превосходной коррозионной стойкостью по сравнению со сплавом Mo_0 . Повышенная коррозионная стойкость обусловлена превосходными защитными свойствами пассивной пленки с повышенным содержанием Cr_2O_3 и оксидов Мо, встроенных в пассивную пленку. В исследовании [10] было обнаружено, что добавление соответствующего количества Со для замены Сг в сплаве $\text{Fe}_{35}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}$ положительно влияет на коррозионную стойкость сплава.

Повышения износостойкости достигают за счет легирования бором [10], ниобием [11], карбидом вольфрама [12]. Легирование бором (0,3 ат. %) изменяет микроструктуру и механизм деформации сплава, что приводит к 35-кратному увеличению износостойкости. Основным механизмом улучшения связан с формированием наноструктурированных слоев и изменением типа износа под воздействием высоких нагрузок. Исследование показало, что добавление ниобия изменяет микроструктуру сплава, значительно повышает твердость и износостойкость покрытий, но снижает их коррозионную стойкость. Максимальная износостойкость наблюдалась при содержании ниобия 1,5 мол. %, при этом коэффициент износа снизился до 84 % при нагрузках 10

и 20 Н по сравнению с исходным сплавом без ниобия. Добавление 5–20 % карбида вольфрама (WC) в высокоэнтропийный сплав CrFeCoNi значительно улучшает его механические свойства. Твердость сплава увеличивается, улучшаются коррозионная стойкость и сопротивляемость износу. Особенно эффективным оказалось добавление 20 % WC, что привело к значительному повышению общей коррозионной стойкости и снижению износа примерно в 4,5 раза.

Для более наглядного сравнения результаты исследований занесены в табл. 1, где приведены данные о скорости износа различных высокоэнтропийных сплавов до и после легирования. Эти данные позволяют оценить эффективность легирования в улучшении износостойкости ВЭС.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что легирование значительно улучшает износостойкость высокоэнтропийных сплавов. Например, для сплава CoCrFeNi легирование бором (В) снизило скорость износа с $2,6 \cdot 10^{-5}$ до $8,3 \cdot 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при нагрузке 2 Н. Аналогично добавление ниобия (Nb) в сплав $\text{AlCr}_2\text{FeCoNi}$ значительно уменьшило скорость износа – с $18,7 \cdot 10^{-6}$ до $5,2 \cdot 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при нагрузке 5 Н. Введение вольфрама (W) в сплав CrFeCoNi также показало значительное снижение скорости износа – с $1,7 \cdot 10^{-4}$ до $3,8 \cdot 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при нагрузке 5 Н. Эти результаты подтверждают, что легирование является эффективным методом повышения износостойкости высокоэнтропийных сплавов, и это делает их более пригодными для применения в условиях высоких нагрузок и интенсивного износа.

Легирование высокоэнтропийных сплавов элементами Nb [13], La [14], Y [15] существенно улучшает их температурную стойкость за счет изменения микроструктуры и химического состава. Указанные элементы способствуют формированию термодинамически стабильных фаз и защитных оксидных пленок, которые препятствуют росту зерен, уменьшают диффузионную подвижность атомов и защищают материал от окисления и коррозии. В результате ВЭС становятся более устойчивыми к высоким температурам и агрессивным условиям эксплуатации, что расширяет их применение в различных высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, энергетическая и автомобильная.

Скорость износа высокоэнтروпийных сплавов до и после легирования
Wear rate of high-entropy alloys before and after alloying

Высокоэнтропийный сплав / High entropy alloy	Металл для легирования / Metal for alloying	Характеристики до легирования / Characteristics before alloying		Характеристики после легирования / Characteristics after alloying	
		Нагрузка, Н / Load, N	Скорость износа, мм ³ /(Н·м) / Wear rate, mm ³ /(N·m)	Нагрузка, Н / Load, N	Скорость износа, мм ³ /(Н·м) / Wear rate, mm ³ /(N·m)
CoCrFeNi [10]	В	2	$2,6 \cdot 10^{-5}$	2	$8,3 \cdot 10^{-6}$
		5	$2,9 \cdot 10^{-5}$	5	$8,6 \cdot 10^{-5}$
		8	$3,57 \cdot 10^{-4}$	8	$8,9 \cdot 10^{-5}$
AlCr ₂ FeCoNi [11]	Nb	5	$18,7 \cdot 10^{-6}$	5	$5,2 \cdot 10^{-6}$
		10	$46,8 \cdot 10^{-6}$	10	$6,5 \cdot 10^{-6}$
		20	$40 \cdot 10^{-6}$	20	$6,2 \cdot 10^{-6}$
CrFeCoNi [12]	W	5	$1,7 \cdot 10^{-4}$	5	$3,8 \cdot 10^{-5}$

Исследование температурной зависимости механических свойств сплавов Co₂₀Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀, Co₁₉Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₁ и Co₁₇Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₃ в диапазоне от 77 до 473 К, проведенное учеными из Томска [16], выявило, что легирование углеродом значительно влияет на их структурные и механические характеристики. Легирование приводит к увеличению параметра кристаллической решетки аустенитной фазы, повышению предела текучести и усилению температурной зависимости прочности за счет твердорастворного, зернограницного и дисперсионного упрочнения, особенно в гетерофазном сплаве Co₁₇Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₃. При этом если однофазные сплавы демонстрируют улучшение механических свойств и пластичности при низких температурах, то гетерофазный сплав становится более хрупким, несмотря на увеличение прочности.

Легирование высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) такими элементами, как титан (Ti) [17], алюминий (Al) [18] и неодим (Nd) [19], играет ключевую роль в улучшении их прочностных свойств. Титан способствует повышению твердости и устойчивости к деформации, алюминий улучшает термоустойчивость и коррозионную стойкость, а добавление неодима способствует улучшению механических характеристик – проч-

ности и пластичности. Эти улучшения делают ВЭС более эффективными для использования в высоконагруженных и критически важных областях, таких как аэрокосмическая, автомобильная и энергетическая промышленность.

Добавление элементов С и Мо [20] в сплав способствует улучшению его пластичности. Углерод и молибден могут использоваться для микролегирования сплава, способствуя формированию мелких карбидных фаз в структуре материала. Эти карбиды могут действовать как преграды для движения дислокаций, что улучшает пластичность сплава. Водород также может быть использован для улучшения пластичности сплава путем снижения сопротивления пластическому деформированию [21, 22]. Растворенный водород способен изменять энергию образования дефектов в материале, что, в свою очередь, может повысить его способность к пластической деформации.

Легирование Zn [23] и Cu [24] играет ключевую роль в изменении электропроводящих характеристик высокоэнтропийных сплавов. Это открывает потенциал для развития энергосберегающих технологий, электрических проводников, сенсоров и элементов электроники. Изменение электропроводящих свойств зависит от состава сплава, температуры, давления

и наличия примесей, что подчеркивает важность легирования в процессе модификации этих материалов.

Были также исследованы усталостные характеристики тонких пленок из высокоэнтروпийного сплава $Al_{0.5}CoCrFeNi$ с различным добавлением алюминия. Результаты показывают, что добавление алюминия может эффективно уменьшить локализацию циклических деформаций и улучшить сопротивление усталости, что связано с уменьшением необратимости циклического скольжения [25]. В исследовании [26] также отмечено, что с добавлением Al к покрытию $FeCoNiTiAl_x$ повышается твердость покрытия и оно проявляет лучшую износостойкость.

Легирование играет важную роль в изменении различных свойств высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Такие элементы, как молибден, кобальт, бор, ниобий, карбид вольфрама, титан, алюминий, неодим, углерод, медь и цинк, используются для улучшения коррозионной стойкости, износостойкости, температурной стойкости, прочностных и пластичностных характеристик, а также электропроводящих свойств высокоэнтропийных сплавов (рис. 3).

Таким образом, легирование представляет собой мощный инструмент для модификации высокоэнтропийных сплавов с целью достижения определенных желаемых свойств и расширения их области применения.



Рис. 3. Улучшение свойств высокоэнтропийных сплавов методом легирования

Fig. 3. Improving the properties of high-entropy alloys by alloying

Покрывтия и их свойства

Методы получения покрытий из ВЭС

При изучении материалов, опубликованных как в российских, так и в зарубежных источниках за последние несколько лет, становится очевидным интерес ученых к получению тонких пленок и покрытий ВЭС. Этот вывод также подтверждает исследование [27], в котором отмечен существенный рост исследований пленок и покрытий высокоэнтропийных сплавов и модифицирование поверхности различными методами в последние пятилетие.

Покрывтия на основе ВЭС в настоящее время представляют большой исследовательский интерес в материаловедении благодаря своей композиционной свободе и выдающимся свойствам,

таким как превосходная твердость и ударная вязкость, высокая стойкость к износу, коррозии и окислению, а также исключительная термическая стабильность [28].

Методы нанесения покрытий из высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) играют ключевую роль в определении их окончательных свойств и областей применения. Выбор технологии нанесения покрытия напрямую влияет на микроструктуру, фазовый состав, адгезию к подложке, а также на механические и функциональные характеристики покрытия. В последние годы наблюдается значительный интерес к разработке и усовершенствованию различных методов нанесения покрытий из ВЭС, что обусловлено их уникальными свойствами – высокой твердостью, стойкостью к износу и коррозии,

термической стабильностью и механической прочностью.

Основные методы нанесения покрытий из ВЭС: лазерная наплавка, магнетронное распыление, процессы нитридирования и окисления подложек. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и особенностями, которые делают их подходящими для различных применений и условий эксплуатации.

Покрытия из высокоэнтروпийного сплава FeNiCoAlCu, полученные методом лазерной наплавки, демонстрируют высокую износостойкость. Результаты исследований показали, что такие покрытия обладают хорошей термической стабильностью при температурах ниже 780 °C. Отмечается также, что они демонстрируют хорошие характеристики износа при высоких температурах, в основном это связано с образованием оксидных пленок на поверхности покрытия. В механизмах износа преобладают абразивный и окислительный износ [29].

Высокоэнтропийные керамические пленки, полученные путем нитридирования или окисления подложек из высокоэнтропийных сплавов, обладают хорошими противоизносными, антирадиационными, антикоррозионными и антиокислительными характеристиками. Перечисленные свойства делают их привлекательными для применения в экстремальных условиях, где нужны высокая температура, высокая прочность и сильное излучение [30].

Магнетронное распыление позволяет получать пленки высокоэнтропийных сплавов с улучшенными свойствами. Например, пленка FeCoNiCuAl, полученная этим методом, демонстрирует улучшенные коррозионные и магнитные свойства по сравнению с объемным сплавом аналогичного состава. Исследования показывают, что такие пленки обладают лучшей коррозионной стойкостью, чем их объемные аналоги [31].

Свойства покрытий из ВЭС

Исследованы коррозионная стойкость, магнитные свойства и микроструктура наплавленных и отожженных пленок. Результаты показывают, что наплавленный ВЭС имеет лучшую коррозионную стойкость, чем объемный высокоэнтропийный сплав с тем же составом. Наиболее актуальные и заметные разработки в области антикоррозионных свойств покрытий

рассмотрены международными специалистами в работе [32].

В исследовании, проведенном авторами [33], были изучены высокоэнтропийные покрытия на основе состава FeCoCrNiMoTiW, изготовленные методом механического легирования. Результаты исследования показали, что твердость этих покрытий превышает твердость большинства нержавеющей сталей в 1,5...2 раза, а коэффициенты сухого трения лежат в области 0,08...0,16. Это значительное различие в коэффициентах трения высокоэнтропийных покрытий обусловлено их наноструктурной особенностью и проявлением у них размерной зависимости свойств. Таким образом, исследование продемонстрировало потенциал этих покрытий в области механических свойств.

В исследовании [34] провели сравнение между покрытием из высокоэнтропийного сплава и образцами стали. Учеными отмечено, что наноструктурное покрытие FeCrNiTiZrAl обладает значительно большей твердостью и устойчивостью к износу по сравнению с нержавеющей сталями. При этом коэффициент трения покрытия FeCrNiTiZrAl значительно ниже, чем у другого материала, что способствует увеличению срока службы изделий с таким покрытием.

Исследование [35] показало, что высокоэнтропийный сплав $\text{Al}_{0,6}\text{CoCrFeNiTi}$ является перспективным материалом для металлических теплоизоляционных покрытий благодаря сочетанию низкой теплопроводности и высокой термической стабильности.

В целом исследования свойств покрытий из высокоэнтропийных сплавов продемонстрировали их уникальные свойства и потенциальные приложения. Результаты исследований подтверждают потенциал ВЭС в области механических, антикоррозионных и теплоизоляционных свойств. Таким образом, покрытия из ВЭС могут стать перспективными материалами для различных индустрий, включая авиацию, автомобильное производство и биомедицинскую индустрию.

Коррозионная стойкость высокоэнтропийных сплавов

Коррозия является одной из основных причин разрушения материалов в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, нефтехимическая и морская техника. Поэтому

исследование коррозионной стойкости ВЭС имеет ключевое значение для их применения в экстремальных условиях эксплуатации. Данный раздел посвящен анализу коррозионных свойств ВЭС и механизмов их устойчивости к коррозии.

Исследование [36] показало, что добавление алюминия в высокоэнтروпийные сплавы FeCoCrNiAl_x , $x = 0, 1; 0,3$, улучшает их механические свойства и снижает вес. Анализировалось влияние алюминия на коррозионное поведение и свойства пленок сплавов в растворах H_2SO_4 . Результаты показали, что увеличение содержания алюминия улучшает устойчивость к коррозии в растворе H_2SO_4 .

Исследование [37] оценило коррозионную стойкость покрытий из высокоэнтропийного сплава FeCoNiCr , полученных методом электрохимического осаждения. Покрытия, синтезированные из растворов сульфатов Fe, Co, Ni и Cr, образовали зернистую поверхность без трещин размером от 500 нм до 5 мкм. Электрохимические измерения продемонстрировали высокую устойчивость покрытий к коррозии в различных средах, включая растворы NaCl , H_2SO_4 и NaOH . Исследование подчеркивает перспективность этих покрытий для применения в инженерной практике благодаря их отличной коррозионной стойкости.

В статье [38] рассматривается влияние ультразвуковой дробеструйной обработки на коррозионную стойкость и антибактериальные свойства высокоэнтропийного сплава $\text{Al}_{0,3}\text{Cu}_{0,5}\text{CoCrFeNi}$. Основной целью исследования было устранение противоречий между коррозионной стойкостью и антибактериальными свойствами сплава путем использования ультразвуковой дробеструйной обработки. Результаты исследования подтвердили, что ультразвуковая дробеструйная обработка улучшила коррозионную стойкость и антибактериальные свойства высокоэнтропийного сплава $\text{Al}_{0,3}\text{Cu}_{0,5}\text{CoCrFeNi}$. Электрохимические испытания показали, что ультразвуковая дробеструйная обработка способствовала образованию более защитной пассивной пленки, снижая плотность тока коррозии.

Учеными был разработан новый высокоэнтропийный сплав $\text{AlTiVCrCu}_{0,4}$, который имеет низкую плотность и высокую твердость. Исследование показало, что двухфазный высокоэнтропийный сплав $\text{AlTiVCrCu}_{0,4}$ обладает уни-

кальными механическими и коррозионными свойствами благодаря своей сложной структуре, состоящей из фаз ВСС и НСР. Сплав обладает выдающейся коррозионной стойкостью в агрессивной среде, что связано с формированием защитной пленки на основе оксидов металлов [39].

Исследование [40] рассматривает влияние холодной прокатки и отжига на коррозионные свойства сплава $\text{Al}_2\text{Cr}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_{53}\text{Ni}_{35}$ с акцентом на изменении размера зерен и их влиянии на коррозионное поведение. Результаты показывают, что уменьшение размера зерен способствует повышению локальной коррозионной стойкости материала. Разработанный сплав демонстрирует улучшенные антикоррозионные свойства, что делает его перспективным для морских применений. Наилучшие коррозионные свойства наблюдаются при уменьшении толщины на 85 % с трехминутным периодом отжига. Благородное поведение материала сохраняется при воздействии растворов с различной концентрацией морской воды.

Было исследовано влияние холодной прокатки и последеформационного отжига на свойства высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi [41]. Результаты показали, что размер зерен уменьшился с 207,5 до 4,6 мкм. Микротвердость, предел текучести и предел прочности при растяжении увеличились на 28, 68 и 24 % соответственно, однако относительное удлинение снизилось с 59,3 до 43,8%. Механизмы упрочнения связаны с уменьшением размера зерен и увеличением плотности дислокаций. Улучшилась также коррозионная стойкость сплава благодаря уменьшению зерен и остаточному напряжению сжатия.

Статья [42] рассматривает влияние трения с перемешиванием на способность сплава CoCrFeNiCu сопротивляться коррозии. Технология трения с перемешиванием включает в себя использование вращающегося инструмента, который перемещается по поверхности материала, генерируя высокую температуру и механические напряжения. Это приводит к пластическому деформированию и перемешиванию металла, что уменьшает размеры зерен сплава, улучшая его прочность и пластичность. После обработки сплав становится более устойчивым к коррозии за счет формирования более стабильной защитной пленки на поверхности.

В работе [43] исследовалось влияние термических ударов на микроструктуру, микротвердость и коррозионные свойства сплава $\text{VCrFeTa}_{0,2}\text{W}_{0,2}$ с пониженной активацией. После термических ударов содержание различных фаз в сплаве менялось, микротвердость увеличивалась, а коррозионная стойкость улучшалась. Сплав показал отличные свойства в условиях жестких окружающих сред, это делает его перспективным материалом для ядерных конструкций.

Из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что добавление различных элементов, улучшение методов синтеза и обработки сплавов, а также оптимизация структуры позволяют улучшить устойчивость материалов к коррозии. Важным фактором является влияние различных технологий обработки и отжига на микроструктуру и свойства сплавов. Исследования показывают, что оптимизация этих параметров может значительно повысить коррозионную стойкость материалов.

Термостойкость и термическая стабильность высокоэнтروпийных сплавов

Термостойкость и термическая стабильность играют важную роль при создании высокоэнтропийных сплавов, которые являются перспективным классом материалов с уникальными свойствами. В данном разделе будут рассмотрены основные аспекты, связанные с устойчивостью этих сплавов к высоким температурам и воздействию термических циклов. Будет проанализировано влияние состава сплава, процесса обработки и микроструктуры на его термические свойства, а также рассмотрены методы улучшения термостойкости и стабильности высокоэнтропийных сплавов.

В последние годы значительное внимание зарубежных исследователей привлекает разработка тугоплавких высокоэнтропийных сплавов (HEAs), которые рассматриваются как перспективный класс материалов для высокотемпературных приложений. Эти сплавы отличаются уникальными механическими свойствами и имеют потенциал для того, чтобы заменить традиционные жаропрочные сплавы на основе никеля в следующем поколении технологий [44].

Особое внимание в исследованиях уделяется применению электроосажденных наноструктурных сплавов, таких как NiFeCoW , NiFeCoMo

и NiFeCoMoW . Эти материалы обладают высокой термической и структурной стабильностью при повышенных температурах и демонстрируют значительное увеличение твердости после отжига. Электроосаждение является эффективным и доступным методом синтеза наноструктурных сплавов, обеспечивающим высокую термическую стабильность [45].

Важным аспектом также является использование методов, направленных на улучшение термической стабильности. Среди них особое значение имеют длительный отжиг и обработка кручением под высоким давлением (КВД). Длительный отжиг способствует рекристаллизации материала, что улучшает его свойства [46]. КВД представляет собой эффективный технологический процесс для изменения формы и структуры материалов путем вращения под давлением. Это находит применение в различных отраслях, включая металлургию, пластмассы и композиты [47].

Исследование [48] показало, что замена молибдена на ванадий в HEAs оказывает значительное влияние на их структурные и термические свойства. Этот подход приводит к образованию кристаллических частиц сложных нитридов в ленточной структуре, что положительно сказывается на термической стабильности и способствует стабилизации переохлажденной жидкости в сплавах с полностью аморфной структурой.

Дополнительно исследование [49] подтверждает, что термическая стабильность высокоэнтропийного сплава $\text{Cr}_{0,8}\text{FeMn}_{1,3}\text{Ni}_{1,3}$ существенно зависит от температуры старения. Во время обработки при 300 °C микроструктура сплава остается стабильной с минимальными изменениями механических свойств. Однако при более высоких температурах (500 и 700 °C) наблюдается сложное фазовое разложение, что существенно влияет на механические характеристики. Эти результаты подчеркивают необходимость строгого контроля параметров тепловой обработки для достижения оптимальных свойств высокоэнтропийных сплавов в различных инженерных приложениях.

В заключение следует отметить, что исследования в области высокоэнтропийных сплавов продолжают расширять наше понимание их потенциала для применения в высокотемпературных условиях. В целом исследования в этой

области продолжают открывать новые горизонты для создания материалов с оптимальными свойствами для будущих технологий.

Прочностные и пластические свойства ВЭС

В данном разделе рассмотрены новейшие достижения в области разработки и улучшения прочностных и пластических свойств HEAs, включая методы их синтеза и обработки, а также применение современных технологических подходов и моделирования.

Разработка новых сплавов с заложенными высокопрочностными свойствами

Активно ведется разработка по созданию новых сплавов с уже заложенными высокопрочностными свойствами. Был предложен легкий и тугоплавкий сплав AlNb_2TiV с плотностью $6,19 \text{ г/см}^3$ и удельным пределом текучести $167 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$. Отмечена хорошая деформируемость данного сплава [50]. В другом исследовании был успешно синтезирован матричный композит $\text{e}_{0,5}\text{MoNbW}(\text{TaC})_{0,5}$ из высокоэнтروпийного сплава. Микроструктура композита оставалась стабильной после отжига при 1300°C в течение 168 ч. Он продемонстрировал замечательную прочность при высоких температурах, предел текучести около 901 МПа и истинный предел прочности на сжатие около 1186 МПа при 1200°C [51]. Композит создает идеальный баланс между сверхвысокой прочностью и высокой пластичностью при высоких температурах. Это открытие может стать важным вкладом в теоретические исследования и приложения в области высокотемпературного антиразмягчения. Большой предел прочности и текучести был отмечен в исследовании, посвященном ВЭС на основе Mo. Предел текучести при сжатии сплава M20 составляет до 1285 МПа, предел прочности – 2447 МПа, а относительное удлинение – 27 % [52].

Недавние исследования, проведенные в НИУ «БелГУ» [53], привели к разработке нового высокоэнтропийного сплава $\text{Co}_{40}\text{Mo}_{28}\text{Nb}_{25}\text{Hf}_7$, который продемонстрировал выдающиеся механические свойства при высоких температурах. Этот сплав, полученный методом вакуумно-дугового переплава, включает в себя фазы ОЦК и Лавеса C14, а также незначительное количество окси-

дов гафния. Исследования показали, что сплав обладает высоким пределом текучести при комнатной температуре (1775 МПа) и сохраняет значительную прочность при 1000°C (600 МПа). В диапазоне температур $22 \dots 1000^\circ\text{C}$ его удельная прочность превосходит многие коммерческие суперсплавы и другие высокоэнтропийные сплавы, что подчеркивает его потенциал для применения в высокотемпературных условиях.

Методы улучшения прочностных свойств

Улучшение прочностных свойств высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) может быть достигнуто различными методами, каждый из которых направлен на оптимизацию микроструктуры и фазового состава материалов.

Одним из таких методов является введение новых градиентных наноразмерных структур дислокационных ячеек в стабильную однофазную гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК) – кристаллическую структуру, в которой атомы расположены в углах и в центре каждой грани куба. Такая конфигурация обеспечивает материалу высокую пластичность и способность к деформации. Дислокационные ячейки, являясь участками локальной деформации в кристаллической решетке, создают дополнительное сопротивление движению дислокаций, что повышает прочность материала без очевидной потери пластичности [54].

Процесс внедрения таких структур включает в себя термомеханическую обработку, контролируемое охлаждение или использование наноразмерных добавок, способствующих формированию дислокационных ячеек с определенными характеристиками. В результате ВЭС с ГЦК-решеткой и градиентными структурами демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики, что делает их перспективными для эксплуатации под высокими нагрузками.

Другим методом является холодная прокатка и последующая лазерная термообработка поверхности. Холодная прокатка – это процесс деформации материала при низких температурах, который приводит к упрочнению материала за счет увеличения плотности дислокаций. Лазерная термообработка поверхности включает в себя использование лазера для локального нагрева и последующего охлаждения материала,

что позволяет модифицировать его микроструктуру и улучшить механические свойства [55].

Спинодальный распад, вызывающий композиционную неоднородность структуры, представляет собой процесс разделения твердого раствора на две фазы с различным химическим составом. В результате спинодального распада формируются нанометровые структуры, которые упрочняют материал. Такая композиционная неоднородность значительно повышает механические характеристики ВЭС, делая их более прочными и надежными для использования в условиях высоких нагрузок и температур [56].

Применение лазерного аддитивного производства для когерентного упрочнения сплавов является еще одним эффективным методом. Лазерное аддитивное производство – это технология, при которой материал добавляется послойно с использованием лазера. Данный метод позволяет точно контролировать микроструктуру и фазовый состав материала, что ведет к улучшению его прочностных свойств [57].

Таким образом, внедрение перечисленных методов позволяет значительно улучшить прочностные свойства ВЭС, обеспечивая высокую прочность и сохранение пластичности, что делает их перспективными для использования в различных высоконагруженных и высокотемпературных приложениях.

Прогнозирование свойств и моделирование

Исследования по повышению прочности высокоэнтропийных сплавов имеют стратегическое значение для создания более совершенных материалов, которые сочетают в себе прочность, легкость и устойчивость к различным условиям эксплуатации. Можно встретить исследования, посвященные прогнозированию прочности высокоэнтропийных сплавов, в частности на основе машинного обучения.

Машинное обучение (Machine Learning, ML) представляет собой подраздел искусственного интеллекта, который обучает компьютерные системы выполнять задачи, не явно запрограммированные для их выполнения. Вместо того чтобы использовать явные инструкции, машины обучаются на основе данных и алгоритмов, выявляя закономерности и делая прогнозы или принимая решения.

В области материаловедения и нанотехнологий многомасштабное моделирование стало важным инструментом для понимания свойств материалов на разных уровнях – от атомного до макроскопического. Использование суперкомпьютеров и высокопроизводительных вычислений позволяет моделировать сложные системы с миллионами атомов и молекул.

Одним из ключевых методов многомасштабного моделирования является метод молекулярной динамики, который позволяет моделировать динамику атомов и молекул на микроскопическом уровне [58]. Этот метод используется для изучения свойств материалов, таких как прочность, упругость, теплопроводность и др. На рис. 4 можно увидеть, как машинное обучение применяется в исследованиях ВЭС.

Кроме того, методы машинного обучения также играют важную роль в анализе данных о материалах. Эти методы применяются для классификации материалов, предсказания их свойств и оптимизации процесса производства. Например, алгоритмы машинного обучения могут быть использованы для определения оптимальной структуры материала или для предсказания его свойств на основе данных о его составе и структуре.

Таким образом, сочетание многомасштабного моделирования и машинного обучения позволяет получить более глубокое понимание свойств материалов и улучшить процесс их проектирования и производства.

С помощью комбинации машинного обучения, феноменологических правил и CALPHAD-моделирования были предсказаны новые перспективные составы тугоплавких высокоэнтропийных сплавов с заданным фазовым составом и механическими свойствами (пределом текучести). Подчеркивается, что создание и модификация свойств пятикомпонентных ВЭС возможно с помощью компьютерных программ CALPHAD, предназначенных для расчета фазовых диаграмм. Исследования, проведенные в Сибирском государственном индустриальном университете, показали, что расчеты фазовых диаграмм CALPHAD подтверждаются экспериментальными данными и позволяют разрабатывать сплавы нового поколения с заданными свойствами [59]. В табл. 2 представлено сравнение прогнозируемого и экспериментального

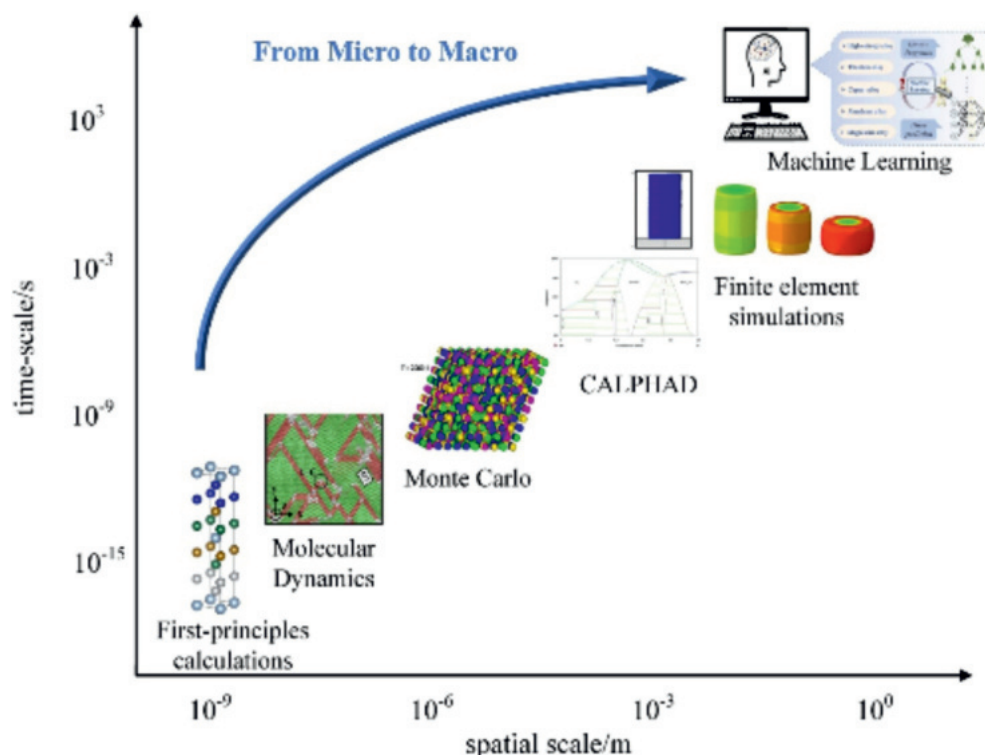


Рис. 4. Принципиальная диаграмма, иллюстрирующая применение многомасштабного моделирования и машинного обучения в исследованиях ВЭС [58]

Fig. 4. Schematic diagram illustrating the application of multiscale modeling and machine learning in HEA research [58]

Таблица 2

Table 2

Сравнение прогнозируемого и экспериментального значения предела текучести различных сплавов
Comparison of predicted and experimental yield strengths of various alloys

Сплав / High-entropy alloy	Температура, °C / Temperature, °C	Прогнозируемый пре- дел текучести, МПа / Predicted yield strength, MPa	Экспериментальный предел текучести, МПа / Experimental yield strength, MPa	Ошибка (%) / Error (%)
MoNbTaTiW [60]	1200	572	585	2,5
AlCrNbTiVZr [61]	600	1409	1093	13
AlCrNbTiVZr [62]	600	837	845	1

результата предела текучести для различных сплавов.

Можно отметить, что прогнозные значения предела текучести для сплавов в большинстве случаев показывают довольно хорошее совпадение с экспериментальными данными, однако имеются случаи, когда ошибки оценок достаточно значительны. Это может быть связано с различными факторами, такими как сложность структуры сплавов, влияние окружающей среды и др.

Относительно перспектив использования машинного обучения в данном контексте следует отметить, что методы машинного обучения могут быть эффективно применены для прогнозирования свойств материалов на основе данных об их составе, структуре и условиях эксплуатации. Это может помочь улучшить точность прогнозирования свойств сплавов и оптимизировать процессы разработки новых материалов с заданными характеристиками.

Исследования пластичности и деформируемости

Исследование пластичности и деформируемости высокоэнтропийных сплавов представляет собой важную область, поскольку эти свойства существенны для их применения в различных отраслях. Указанная тема освещается учеными с разных направлений: исследуется пластическая деформация высокоэнтропийных сплавов под механической обработкой [63] и одновременное повышение прочности и пластичности высокоэнтропийного сплава с помощью механизма очистки [64]. Изучено также влияние электронного облучения на микроструктуру и пластичность после отжига при промежуточной температуре. Суть пластичности, вызванной облучением, заключается в измельчении и перераспределении нанопреципитатов. Оптимизация размера и распределения улучшила взаимодействие между нанопреципитатами и дислокациями, эффективно предотвращая хрупкие переломы, вызванные концентрацией напряжений [65].

Повышение термоустойчивости и пластичности ВЭС достигается путем введения в них твердых и хрупких боридов. Бориды обеспечивают многократное повышение пластичности материалов без ущерба для их прочности. Кроме того, вблизи боридов происходит химический переход порядок-беспорядок, что улучшает подвижность дислокаций и способствует пластической деформируемости материала. Наличие стабильных боридов также предотвращает укрупнение зерен в материале при повышенных температурах, поскольку бориды закрепляют зерна и стабилизируют их размеры [66].

Таким образом, данный раздел подчеркивает важность комплексного подхода к разработке и улучшению ВЭС, включая синтез новых сплавов, совершенствование методов обработки и применение современных технологий моделирования и прогнозирования. Это способствует созданию материалов с уникальными комбинациями прочностных и пластических свойств, необходимых для использования в экстремальных условиях эксплуатации.

Электропроводящие и магнитные свойства

Исследования высокоэнтропийных сплавов в области электрических и магнитных полей предоставляют новые возможности для создания

материалов с уникальными электромагнитными свойствами, это позволяет развивать энергосберегающие технологии, электрические проводники, сенсоры или элементы электроники.

Изменение электропроводящих свойств высокоэнтропийных сплавов зависит от нескольких факторов, таких как состав сплава, температура, давление и наличие примесей. Обработка отжигом является важным методом влияния на электропроводящие свойства ВЭС. Термическая обработка может приводить к изменению микроструктуры сплава, включая рекристаллизацию зерен, уменьшение дислокаций и изменение фазового состава, что влияет на электрическую проводимость материала. Например, отжиг может способствовать восстановлению электропроводящих свойств после механической деформации или улучшению структурной однородности сплава [67, 68].

На изменение электропроводящих свойств может повлиять давление. В нормальном состоянии сплав TiZrHfNb демонстрирует высокое электрическое сопротивление, которое практически не зависит от температуры, но в значительной степени зависит от давления – линейно уменьшается на 12,5 % при повышении давления до 5,5 ГПа [69].

В рамках электропроводящих свойств можно отметить исследование, посвященное обработке поверхности электроимпульсной ультразвуковой прокаткой [70]. В работе использовались пять элементов: хром (Cr), марганец (Mn), железо (Fe), кобальт (Co) и никель (Ni), с высокой степенью чистоты (99,9 %) и эквимольным соотношением. Эти элементы были расплавлены в вакуумной плавильной печи с использованием электромагнитной индукции, что обеспечило высокую однородность состава сплава.

Основным достижением исследования стало значительное улучшение прочностных характеристик сплава на разрыв при комнатной температуре благодаря применению метода ультразвуковой прокатки поверхности. Этот процесс осуществлялся на специальной платформе для самостоятельной сборки, что позволяет точно контролировать параметры обработки и обеспечивать высокую воспроизводимую результатов (рис. 5). Ультразвуковая обработка поверхности способствует улучшению механических свойств материала путем снижения микропористости и

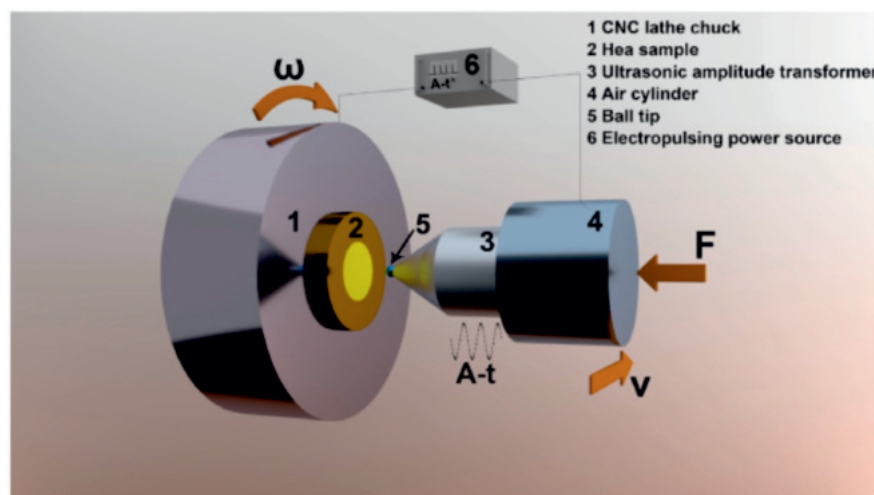


Рис. 5. Схема процесса электроимпульсной ультразвуковой поверхностной прокатки [70]

Fig. 5. Electropulse ultrasonic surface rolling process diagram [70]

улучшения адгезии на границах зерен, это имеет большое значение для его электропроводящих свойств.

Магнитные свойства высокоэнтропийных сплавов представляют собой одну из наиболее интересных и малоизученных областей в материаловедении. В частности, атомная структура ВЭС является фактором, влияющим на их магнитные свойства.

Исследование показало, что сплав CoCuFeMnNi , полученный с использованием методов механического сплавления и спекания в искровой плазме, обладает значительными магнитными свойствами, включая высокую индукцию насыщения и низкую коэрцитивную силу при заданных магнитных условиях. Эти характеристики делают сплав CoCuFeMnNi перспективным материалом для применения в области мягкой магнитной техники [71].

В исследовании [72] провели замену марганца хромом в высокоэнтропийном сплаве FeCoNiAlMn , что существенно повлияло на его магнитные свойства. Наилучшие результаты достигаются при определенной концентрации хрома, при которой наблюдается значительное повышение индукции насыщения. В частности, сплав $\text{FeCoNiAlMn}_{0,4}\text{Cr}_{0,6}$ демонстрирует оптимальные магнитные характеристики, это делает его перспективным кандидатом для применения в мягкой магнитной технике. Описанный эффект связан с изменением микроструктуры

и размеров кристаллитов в зависимости от содержания Cr, что влияет на магнитные свойства сплава.

Исследование электропроводящих и магнитных свойств высокоэнтропийных сплавов подчеркивает их потенциал для создания материалов с уникальными характеристиками в электрических и магнитных приложениях. Влияние состава сплава, термической обработки и давления на электропроводящие свойства активно изучается, что открывает пути для управления электрической проводимостью.

Оптимизация микроструктуры и состава сплавов, включая замену марганца на хром, также способствует улучшению магнитных свойств.

Перспективы применения высокоэнтропийных сплавов

Несмотря на значительное количество исследований, высокоэнтропийные сплавы остаются перспективной темой для изучения. Это связано с их уникальными свойствами, такими как высокая прочность, коррозионная стойкость, износостойкость и др.

Кроме того, эти сплавы имеют большой потенциал для применения в различных отраслях промышленности. Китайские исследователи видят большую перспективность применения таких сплавов в энергетике – в частности, создание суперконденсатора, новых электродных и диэлектрических материалов, разработка твердоок-

сидного топливного элемента [73]. В Сибирском государственном индустриальном университете говорят о применении ВЭС в качестве покрытий деталей судов, в разнородных сварных соединениях и деталях ядерных реакторов [74]. В Южно-Уральском государственном университете в результате выполненной работы было установлено, что прочностные и пластические свойства рассмотренных ВЭС соответствуют лучшим образцам высоколегированных аустенитных сталей, применяемых для криогенной техники [75]. В Воронежском государственном лесотехническом университете им. Г.Ф. Морозова говорят о перспективе применения высокоэнтروпийных сплавов для восстановления деталей машин атмосферным плазменным напылением [76]. В The University of Manchester считают, что расширенная композиционная свобода, предоставляемая высокоэнтропийными сплавами, дает уникальную возможность разработки сплавов для передовых ядерных применений – в частности, там, где существующие технические сплавы не справляются [77].

Обсуждение

Исследование высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) является актуальной и перспективной темой в современном материаловедении, которая охватывает широкий спектр научных и инженерных исследований. Целью настоящей работы было освещение последних достижений в этой области, проведение сравнительного анализа опубликованных исследований и выявление наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований.

В разделе о методах получения ВЭС рассмотрены различные технологии, включая механическое сплавление, вакуумную индукционную плавку, а также методы добавления легирующих элементов. Эти методы направлены на достижение высокой однородности состава и микроструктуры сплавов, что критически важно для их механических и физических свойств.

Легирование высокоэнтропийных сплавов играет ключевую роль в тюнинге их химического состава для оптимизации механических, термических и коррозионных свойств. Покрытия на основе ВЭС представляют собой перспективное направление для защиты материалов от корро-

зии и износа, что особенно важно в авиационной и ядерной промышленности.

Особое внимание уделено исследованиям термостойкости и термической стабильности ВЭС, которые важны при применении в экстремальных условиях, таких как высокие температуры и агрессивные окружающие среды.

Прочностные и пластические свойства ВЭС оказываются на передовой линии изучения, поскольку эти материалы часто превосходят традиционные сплавы в показателях прочности и устойчивости к деформации.

Наиболее перспективным направлением для дальнейшего изучения можно считать электропроводящие и магнитные свойства высокоэнтропийных сплавов. Это направление открывает значительные возможности для разработки новых энергосберегающих технологий, высокоэффективных сенсоров и магнитных материалов, что может привести к существенным инновациям в таких областях, как электроника, энергетика и информационные технологии.

Заключение

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что высокоэнтропийные сплавы представляют собой перспективный класс материалов с огромным потенциалом для инноваций. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение знаний в области составов, методов и свойств ВЭС, а также на разработку новых материалов с улучшенными характеристиками. Это откроет новые горизонты для технологических достижений, улучшит эффективность и надежность материалов, используемых в различных секторах промышленности.

Список литературы

1. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6. – P. 299–303. – DOI: 10.1002/adem.200300567.
2. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.

3. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2020. – Vol. 121 (8). – P. 733–764. – DOI: 10.1134/S0031918X20080098. – EDN: TY-MYVL.
4. Cui K., Zhang Y. High-entropy alloy films // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13 (3). – P. 635. – DOI: 10.3390/coatings13030635.
5. On the laser additive manufacturing of high-entropy alloys: a critical assessment of in-situ monitoring techniques and their suitability / M.A. Mahmood, F.G. Alabtah, Y. Al-Hamidi, M. Khraisheh // *Materials & Design*. – 2023. – Vol. 226. – P. 111658. – DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111658.
6. Achieving excellent wear and corrosion properties in laser additive manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloy by laser shock peening / Z. Tong, X. Pan, W. Zhou, Y. Yang, Y. Ye, D. Qian, X. Ren // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 422. – P. 127504. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127504.
7. Исследование сплава, полученного методом дуговой наплавки высокоэнтропийной порошковой проволокой / Р.Е. Крюков, А.Р. Михно, С.В. Коновалов, И.А. Панченко, И.А. Махнев // *Ползуновский вестник*. – 2024. – № 2. – С. 228–234. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.030. – EDN: OCJLCW.
8. Effect of Mo addition on microstructural evolution and corrosion behaviors of AlCrFeNi₃ eutectic high-entropy alloy / J. Wang, H. Jiang, W. Xie, X. Kong, S. Qin, H. Yao, Y. Li // *Corrosion Science*. – 2024. – Vol. 229. – P. 111879. – DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111879.
9. Zeng W.P., Chen Y., Ye J. Effect of partial substitution of Cr with Co on the properties of Fe₃₅Ni₂₀Cr₂₀Co_xMo₅P₁₂C₄B₄ high-entropy bulk metallic glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2024. – P. 625. – DOI: 10.2139/ssrn.4563223.
10. Significant improvement in wear resistance of CoCrFeNi high-entropy alloy via boron doping / H. Zhang, J. Miao, C. Wang, T. Li, L. Zou, Y. Lu // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11. – P. 386. – DOI: 10.3390/lubricants11090386.
11. Effect of Nb addition on the corrosion and wear resistance of laser clad AlCr2FeCoNi high-entropy alloy coatings / X. Ji, K. Guan, Y. Bao, Z. Mao, F. Wang, H. Dai // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 12. – P. 5. – DOI: 10.3390/lubricants12010005.
12. Effect of tungsten carbide (WC) on electrochemical corrosion behavior, hardness, and microstructure of CrFeCoNi high entropy alloy / A.H. Khallaf, M. Bhlol, O.M. Dawood, I.M. Ghayad, O.A. Elkady // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2022. – Vol. 69. – P. 97. – DOI: 10.1186/s44147-022-00097-1.
13. A novel strategy for architecting low interfacial energy transition phase to enhance thermal stability in a high-entropy alloy / Y. Zhang, N. Qiu, Z. Shen, C. Liu, X. Zuo // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 947. – P. 169570. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169570.
14. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1907. – DOI: 10.3390/met11121907.
15. Polat G., Tekin M., Kotan H. Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy // *Intermetallics*. – 2022. – P. 107589. – DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107589.
16. Температурная зависимость деформационного поведения высокоэнтропийных сплавов Co₂0Cr₂0Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀, Co₁₉Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₁ и Co₁₇Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₃. Механические свойства и температурная зависимость предела текучести / Е.Г. Астафурова, К.А. Реунова, С.В. Астафуров, Д.О. Астапов // *Физическая мезомеханика*. – 2023. – Т. 26, № 6. – С. 5–16. – DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_6_5. – EDN: OLJPSG.
17. Enhancement of strength-ductility balance of heavy Ti and Al alloyed FeCoNiCr high-entropy alloys via boron doping / Y. Qi, T. Cao, H. Zong, Y. Wu, L. He, X. Ding, F. Jiang, S. Jin, G. Sha, J. Sun // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2020. – Vol. 75. – P. 154–166. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.023.
18. Tailoring strength and ductility of high-entropy CrMnFeCoNi alloy by adding Al / X. Xian, Z.-H. Zhong, L.-J. Lin, Z.-X. Zhu, C. Chen, Y.-C. Wu // *Rare Metals*. – 2018. – Vol. 41. – P. 1015–1021. – DOI: 10.1007/s12598-018-1161-4.
19. Hardness and strength enhancements of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with Nd doping / C. Wang, T.-H. Li, Y.-C. Liao, C.-L. Li, J.S.-C. Jang, C.-H. Hsueh // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – P. 138192. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138192.
20. Excellent plasticity of C and Mo alloyed TRIP high entropy alloy via rolling and heat treatment / Z. Pengjie, W. Shuhuan, L. Yukun, C. Liansheng, L. Kun, Z. Dingguo // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 2145–2151. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.018.
21. Enhanced strength and plasticity of selective laser melted NbMoTaW refractory high-entropy alloy via carbon microalloying / J. Xu, R. Duan, K. Feng, C. Zhang, P. Liu, Z. Li // *SSRN Electronic Journal*. – 2022. – DOI: 10.2139/ssrn.4108454.
22. Influence of hydrogen on incipient plasticity in CoCrFeMnNi high-entropy alloy / G. Yang, Y. Zhao, D.-H. Lee, J.-M. Park, M.-Y. Seok, J.-Y. Suh, U. Ramamurty, J.-I. Jang // *Scripta Materialia*. – 2018. – Vol. 161. – P. 23–28. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.010.



23. Effects of tailoring Zn additions on the microstructural evolution and electrical properties in GaInSnZn high-entropy alloys / J. Bai, Z. Wang, M. Zhang, J. Qiao // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – Vol. 25. – P. 2201831. – DOI: 10.1002/adem.202201831.

24. Effect of Cu content on electrical resistivity, mechanical properties and corrosion resistance of AlCuNiTiZr_{0.75} high entropy alloy films / K. Huang, G. Wang, H. Qing, Y. Chen, H. Guo // *Vacuum*. – 2021. – Vol. 195. – P. 110695. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110695.

25. Enhancing fatigue life by ductile-transformable multicomponent B₂ precipitates in a high-entropy alloy / R. Feng, Y. Rao, C. Liu, X. Xie, D. Yu, Y. Chen, M. Ghazisaeidi, T. Ungar, H. Wang, K. An, P.K. Liaw // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. – P. 1–12. – DOI: 10.1038/s41467-021-23689-6.

26. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1907. – DOI: 10.3390/met11121907.

27. Покрyтия из высокоэнтропийных сплавов: состояние проблемы и перспективы развития / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, О.А. Перегудов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2022. – Т. 65, № 10. – С. 683–692. – DOI: 10.17073/0368-0797-2022-10-683-692.

28. High-entropy alloy based coatings: microstructures and properties / Y. Chen, P. Munroe, Z. Xie, S. Zhang // *Protective thin coatings technology*. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2021. – P. 205–232. – DOI: 10.1201/9781003088349-6.

29. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating / G. Jin, Z. Cai, Y. Guan, X. Cui, Z. Liu, Y. Li, M. Dong, D. Zhang // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 445. – P. 113–122. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.03.135.

30. Preparing high-entropy ceramic films from high-entropy alloy substrate / F. Li, W. Cui, Y. Shao, J. Zhang, S. Du, Z. Chen, Z. Tian, K. Chen, G. Liu // *Materials Chemistry and Physics*. – 2022. – Vol. 287. – P. 126365. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126365.

31. A novel magnetic FeCoNiCuAl high-entropy alloy film with excellent corrosion resistance / B. Li, H. Li, Y. Xia, M. Chen, Z. Wu, X. Tan, H. Xu // *SSRN Electronic Journal*. – 2023. – DOI: 10.2139/ssrn.4392421.

32. Lin C., Yao Y. Corrosion-resistant coating based on high-entropy alloys // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 205. – DOI: 10.3390/met13020205.

33. Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М. Высокоэнтропийные покрытия FeCoCrNiMoTiW и их свойства // *Евразийский союз ученых. Серия: Технические и физико-математические науки*. – 2021. – № 6 (87). – С. 12–16. – DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.87.1386.

34. Yurov V.M., Eremin E.N., Guchenko S. Microhardness and wear resistance of a high-entropy coating FeCrNiTiZrAl // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2182. – DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012083.

35. Novel candidate of metal-based thermal barrier coatings: high-entropy alloy / X. Wang, H. Yao, L. Yuan, L. Chen, F. Xu, Z. Tan, D. He, Y. Yang, Y. Liu, Z. Zhou // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 474. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130087.

36. The corrosion behavior and film properties of Al-containing high-entropy alloys in acidic solutions / Y. Fu, C. Dai, H. Luo, D. Li, C. Du, X. Li // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 560. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.149854.

37. Electrochemical deposition and corrosion resistance characterization of FeCoNiCr high-entropy alloy coatings / Z. Xu, Y. Wang, X. Gao, L. Peng, Q. Qiao, J. Xiao, F. Guo, R. Wang, J. Yu // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1167. – DOI: 10.3390/coatings13071167.

38. Effects of ultrasonic shot peening on the corrosion resistance and antibacterial properties of Al_{0.3}Cu_{0.5}CoCrFeNi high-entropy alloys / X. Chen, T. Cui, S. He, W. Chang, Y. Shi, Y. Lou // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13. – P. 246. – DOI: 10.3390/coatings13020246.

39. Investigation of mechanical and corrosion properties of light and high hardness cast AlTiVCrCu_{0.4} high entropy alloy / K. Liu, X. Li, J. Wang, Y. Zhang, X. Guo, S. Wu, H. Yu // *Materials Characterization*. – 2023. – Vol. 200. – DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112878.

40. The grain size effect on corrosion property of Al₂Cr₅Cu₅Fe₅₃Ni₃₅ high-entropy alloy in marine environment / L. Xue, Y. Ding, K. Pradeep, R. Case, H. Castaneda, M. Paredes // *Corrosion Science*. – 2022. – Vol. 208. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110625.

41. Improved mechanical and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy with cold rolling and post deformation annealing process / Y. Zou, S. Li, S. Liu, J. Li, Y. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 887. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161416.

42. Simultaneously increasing mechanical and corrosion properties in CoCrFeNiCu high entropy alloy via friction stir processing with an improved hemispherical convex tool / N. Li, H. Zhang, L. Wu, Z. Li, H. Fu, D. Ni, P. Xue, F. Liu, B. Xiao, Z. Ma // *Materials Characterization*. – 2023. – Vol. 203. – DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113143.

43. Effects of transient thermal shock on the microstructures and corrosion properties of a reduced activation high-entropy alloy / W.-R. Zhang, W.-B. Liao, P.K. Liaw, J.-L. Ren, J. Brechtel, Y. Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 918. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165762.

44. Refractory high-entropy alloys: a focused review of preparation methods and properties / W. Xiong,

A.X. Guo, S. Zhan, C.T. Liu, S.C. Cao // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 142. – P. 196–215. – DOI: 10.1016/j.jmst.2022.08.046.

45. Haché M.J., Zou Y., Erb U. Thermal stability of electrodeposited nanostructured high-entropy alloys // Surface and Coatings Technology. – 2024. – Vol. 474. – P. 130719. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130719.

46. Alloying behavior and thermal stability of mechanically alloyed nano AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy / V. Shivam, Y. Shadangi, J. Basu, N.K. Mukhopadhyay // Journal of Materials Research. – 2019. – Vol. 34. – P. 787–795. – DOI: 10.1557/jmr.2019.5.

47. Hardening and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeNiMnTi high-entropy alloy processed by high-pressure torsion / H. Shahmir, M. Nili-Ahmadabadi, A. Shafie, T. Langdon // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 194. – DOI: 10.1088/1757-899X/194/1/012017.

48. Влияние замены молибдена на ванадий на склонность к аморфизации, структуру и теплофизические свойства высокоэнтروпийных сплавов системы Fe-Co-Ni-Cr-(Mo,V)-B / А.И. Базлов, И.В. Строчко, Е.Н. Занаева, Е.В. Убировка, М.С. Пархоменко, Д.А. Милькова, В.В. Брюханова // Металлург. – 2023. – № 11. – С. 86–92. – DOI: 10.52351/00260827_2023_11_86.

49. Role of aging temperature on thermal stability of Co-free $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMn}_{1.3}\text{Ni}_{1.3}$ high-entropy alloy: decomposition and embrittlement at intermediate temperatures / H. Sun, T. Liu, H. Oka, N. Hashimoto, Y. Cao, R. Luo // Materials Characterization. – 2024. – Vol. 210. – P. 113804. – DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113804.

50. A novel lightweight refractory high-entropy alloy with high specific strength and intrinsic deformability / X. Liu, Z. Bai, X. Ding, J. Yao, L. Wang, Y. Su, Z. Fan, J. Guo // Materials Letters. – 2020. – Vol. 287. – P. 129255. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.129255.

51. High-temperature ultra-strength of dual-phase $\text{Re}_{0.5}\text{MoNbW}(\text{TaC})_{0.5}$ high-entropy alloy matrix composite / Q. Wei, G. Luo, R. Tu, J. Zhang, Q. Shen, Y. Cui, Y. Gui, A. Chiba // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 84. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.12.015.

52. Development of high strength high plasticity refractory high entropy alloy based on Mo element optimization and advanced forming process / H. Zhang, J. Cai, J. Geng, X. Sun, Y. Zhao, X. Guo, D. Li // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 112. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106163.

53. Высокоэнтропийный сплав на основе системы Co-Mo-Nb-Hf с высокой прочностью при 1000 °C / Е.С. Панина, Н.Ю. Юрченко, А. Тожибаев, С.В. Жеребцов, Н.Д. Степанов // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022

(ICMSSTE 2022): материалы Международной научно-практической конференции. – Симферополь, 2022. – С. 128–134. – EDN ZCNRGA.

54. Gradient cell-structured high-entropy alloy with exceptional strength and ductility / Q. Pan, L. Zhang, R. Feng, Q. Lu, K. An, A.C. Chuang, J.D. Poplawsky, P.K. Liaw, L. Lu // Science. – 2021. – Vol. 374. – P. 984–989. – DOI: 10.1126/science.abj8114.

55. Enhanced strength-ductility of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with inverse gradient-grained structure prepared by laser surface heat-treatment technique / B. Zhang, J. Chen, P. Wang, B. Sun, Y. Cao // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 111. – P. 111–119. – DOI: 10.1016/j.jmst.2021.09.043.

56. Achieving high strength and ductility in high-entropy alloys via spinodal decomposition-induced compositional heterogeneity / Y. Chen, Y. Fang, R. Wang, Y. Tang, S. Bai, Q. Yu // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 141. – P. 149–154. – DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.018.

57. Design and coherent strengthening of ultra-high strength refractory high entropy alloys based on laser additive manufacturing / J. Cai, H. Zhang, L. Wang, X. Sun, X. Xu, X. Guo, D. Li // SSRN Electronic Journal. – 2023. – DOI: 10.2139/ssrn.4469753.

58. Jiang D., Xie L., Wang L. Current application status of multi-scale simulation and machine learning in research on high-entropy alloys // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 1341. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.233.

59. Вектор развития улучшения свойств ВЭС Кантора / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, С. Чен, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, В.В. Шляров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – № 2 (44). – С. 3–12. – DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-3-12. – EDN ICZXP.

60. Machine learning-based strength prediction for refractory high-entropy alloys of the Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr system / D. Klimenko, N. Stepanov, J. Li, Q. Fang, S. Zharebtsov // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 7213. – DOI: 10.3390/ma14237213.

61. Yield strength prediction of high-entropy alloys using machine learning / U. Bhandari, R. Rafi, C. Zhang, S. Yang // Materials Today Communications. – 2020. – Vol. 26. – P. 101871. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101871.

62. Prediction of strength characteristics of high-entropy alloys Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr systems / D.N. Klimenko, N.Y. Yurchenko, N.D. Stepanov, S.V. Zharebtsov // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38. – P. 1535. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.145.

63. Li J., Fang Q. Investigation into plastic deformation and machining-induced subsurface damage of

high-entropy alloys // Simulation and experiments of material-oriented ultra-precision machining. – Springer, 2019. – P. 23–52. – DOI: 10.1007/978-981-13-3335-4_2.

64. Plasticity of CrMnFeCoNi high-entropy alloy via a purification mechanism / C. Wu, J. Li, W. Qiu, F. Lian, L. Huang, J. Zhu, L. Chen // SSRN Electronic Journal. – 2023. – DOI: 10.2139/ssrn.4415770.

65. Enhanced plasticity in a Zr-rich refractory high-entropy alloy via electron irradiation / J. Hao, Y. Zhang, Q. Wang, Y. Ma, L. Sun, Z. Zhang // Journal of Nuclear Materials. – 2023. – Vol. 590. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154876.

66. Enhanced plasticity in refractory high-entropy alloy via multicomponent ceramic nanoparticle / H. Li, F. Cao, T. Li, Y. Tan, Y. Chen, H. Wang, P.K. Liaw, L. Dai // Journal of Materials Science & Technology. – 2024. – Vol. 194. – P. 51–62. – DOI: 10.1016/j.jmst.2024.01.030.

67. High temperature electrical properties and oxidation resistance of V-Nb-Mo-Ta-W high entropy alloy thin films / Y.-Y. Chen, S.-B. Hung, C.-J. Wang, W.-C. Wei, J.-W. Lee // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 375. – P. 854–863. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.080.

68. Effects of annealing on microstructure, mechanical and electrical properties of AlCrCuFeMnTi high entropy alloy / Z. Nong, J. Zhu, X. Yang, H. Yu, Z. Lai // Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition. – 2013. – Vol. 28. – P. 1196–1200. – DOI: 10.1007/s11595-013-0844-9.

69. Pressure effects on electronic structure and electrical conductivity of TiZrHfNb high-entropy alloy / S. Uporov, R. Ryltsev, V. Sidorov, S.K. Estemirova, E. Sterkhov, I. Balyakin, N. Chtchelkatchev // Intermetallics. – 2022. – Vol. 140. – DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107394.

70. Microstructure and mechanical properties of high entropy CrMnFeCoNi alloy processed by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling / J. Xie, S. Zhang, Y. Sun, Y. Hao, B. An, Q. Li, C.A. Wang // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 795. – P. 140004. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.140004.

71. Fabrication of a novel magnetic high entropy alloy with desirable mechanical properties by mechanical

alloying and spark plasma sintering / M. Karimi, M. Shamsanian, M. Enayati, M. Adamzadeh, M. Imani // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 84. – P. 859–870. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.048.

72. Effect of Cr-doping on the structural and magnetic properties of mechanically alloyed FeCoNiAlMn-Cr high-entropy alloy powder / D.N. Siddiqui, N. Mehboub, A. Zaman, A.M. Alsuhaibani, A. Algahtani, V. Tirth, S. Alharthi, N.H. Al-Shaalan, M.A. Amin // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8. – P. 19892. – DOI: 10.1021/acsomega.3c01823.

73. $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$ high entropy alloys for magnetocaloric refrigeration near room temperature / Z. Dong, S. Huang, V. Ström, G. Chai, L.K. Varga, O. Eriksson, L. Vitos // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 79. – P. 15–20. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.071.

74. Application of high-entropy alloys / V.E. Gromov, Y.A. Shlyarova, S.V. Konovalov, S.V. Vorob'ev, O.A. Peregudov // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2021. – Vol. 64. – P. 747. – DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754.

75. Перспективы применения высокоэнтروпийных сплавов для техники при криогенных температурах / И.И. Сулейманова, М.А. Иванов, А.К. Тиньгаев, Е.А. Трофимов // EURASTRENCOLD-2022: сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской академии наук, Якутск, 12–16 сентября 2022 г. – Киров, 2022. – С. 418–422. – EDN TAEIPM.

76. Кадырметов А.М., Попов Д.А., Снятков Е.В. Перспективы применения высокоэнтропийных сплавов для восстановления деталей машин атмосферным плазменным напылением // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 1 (72). – С. 20–27. – DOI: 10.33979/2073-7432-2021-72-1-20-27. – EDN DCXPHK.

77. High-entropy alloys for advanced nuclear applications / E.J. Pickering, A.W. Carruthers, P.J. Barron, S.C. Middleburgh, D.E.J. Armstrong, A.S. Gandy // Entropy. – 2021. – Vol. 23. – P. 98. – DOI: 10.3390/e23010098.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



A review of research on high-entropy alloys, its properties, methods of creation and application

Anna Shubert ^{a, *}, Sergey Konovalov ^b, Irina Panchenko ^c

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7355-2955>, shubert-anna@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>, konovalov@sibsiu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>, i.r.i.ss@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 April 2024

Revised: 17 May 2024

Accepted: 17 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

High-entropy alloys

Wear resistance

Heat resistance

Thermal stability

Plasticity

Alloying

Funding

This study is funded by a grant of the Russian Science Foundation, project 23-49-00015. <https://rscf.ru/en/project/23-49-00015/>.

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the prospects for studying high-entropy alloys (*HEA*), metal materials with unique properties. The study of high-entropy alloys is an urgent area of research in connection with its properties, environmental sustainability, economic benefits and technological potential. *HEA* are of interest to researchers due to its stability, strength, corrosion resistance and other characteristics, which makes it promising for use in the aerospace industry, automotive, medicine and microelectronics. Thus, *HEA* research contributes to the development of new materials and technological progress, providing opportunities for creating innovative products and improving existing solutions. To effectively use the potential of high-entropy alloys, research is required in a number of areas. First, it is necessary to improve the production technology of such alloys and develop new methods for obtaining *HEA* with improved characteristics and reduced cost. Secondly, it is necessary to establish the basic principles of operation of high-entropy alloys and to study the mechanisms influencing its properties. It is also necessary to develop new alloys with specified properties and conduct experiments and computer simulations to optimize the characteristics of the alloys and determine the best compositions. **The purpose of the work** is to study developments in the field of high-entropy alloys and conduct a comparative analysis of published studies on improving the properties of high-entropy alloys. **The research method** is a review and analysis based on developments mainly for 2020-2024, which were carried out by domestic and foreign scientists. The paper discusses the prospects for the study of high-entropy alloys, materials with a wide range of applications in various industries. The paper presents the results of research, mainly for 2020-2024. The main properties of high-entropy alloys are described, such as high strength, corrosion resistance, fatigue properties, plasticity and deformability, thermal stability, electrical conductivity and magnetic properties, as well as the possibility of creating alloys with specified characteristics. The most common methods of changing the properties of alloys have been identified. The directions of further development of research in this area are considered. **Results and discussion:** a literature review shows that developments and research are carried out on all possible properties of *HEA*, but most of it is devoted to corrosion-resisting properties and thermal stability. Of the methods used in high-entropy alloys, the most common and universal can be considered the alloying of high-entropy alloys with other metals. Studies also confirm that alloying metals are selected depending on its characteristic properties. The number of scientific works also confirms the relevance of this topic and the need for its study. The authors noted that future studies on the fatigue properties of high-entropy alloys, as well as the properties of alloys under the influence of magnetic and electric fields are the most interesting.

For citation: Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.A. A review of research on high-entropy alloys, its properties, methods of creation and application. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 153–179. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-153-179. (In Russian).

References

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.

* Corresponding author

Shubert Anna V., Post-graduate Student
Siberian State Industrial University,
42 Kirova st.,
654007, Novokuznetsk, Russia

Tel.: +7 913 437-89-70, e-mail: shubert-anna@mail.ru



2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121 (8), pp. 733–764. DOI: 10.1134/S0031918X20080098.
4. Cui K., Zhang Y. High-entropy alloy films. *Coatings*, 2023, vol. 13 (3), p. 635. DOI: 10.3390/coatings13030635.
5. Mahmood M.A., Alabtah F.G., Al-Hamidi Y., Khraisheh M. On the laser additive manufacturing of high-entropy alloys: A critical assessment of in-situ monitoring techniques and their suitability. *Materials & Design*, 2023, vol. 226, p. 111658. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111658.
6. Tong Z., Pan X., Zhou W., Yang Y., Ye Y., Qian D., Ren X. Achieving excellent wear and corrosion properties in laser additive manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloy by laser shock peening. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 422, p. 127504. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127504.
7. Kryukov R.E., Mikhno A.R., Konovalov S.V., Panchenko I.A. Makhnev I.A. Issledovaniye splava, poluchennogo metodom dugovoy naplavki vysokoentropiynoy poroshkovoy provolokoy [Investigation of an alloy produced by the method of arc surface welding with high entropy fluid wire]. *Polzunovskiy vestnik*, 2024, no. 2, pp. 228–222. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.030. (In Russian).
8. Wang J., Jiang H., Xie W., Kong X., Qin S., Yao H., Li Y. Effect of Mo addition on microstructural evolution and corrosion behaviors of AlCrFeNi₃ eutectic high-entropy alloy. *Corrosion Science*, 2024, vol. 229, p. 111879. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111879.
9. Zeng W.P., Chen Y., Ye J. Effect of partial substitution of Cr with Co on the properties of Fe₃₅Ni₂₀Cr_{20-x}Co_xMo₅P₁₂C₄B₄ high-entropy bulk metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2024, p. 625. DOI: 10.2139/ssrn.4563223.
10. Zhang H., Miao J., Wang C., Li T., Zou L., Lu Y. Significant improvement in wear resistance of CoCrFeNi high-entropy alloy via boron doping. *Lubricants*, 2023, vol. 11, p. 386. DOI: 10.3390/lubricants11090386.
11. Ji X., Guan K., Bao Y., Mao Z., Wang F., Dai H. Effect of Nb addition on the corrosion and wear resistance of laser clad AlCr2FeCoNi high-entropy alloy coatings. *Lubricants*, 2023, vol. 12, p. 5. DOI: 10.3390/lubricants12010005.
12. Khallaf A.H., Bhlol M., Dawood O.M., Ghayad I.M., Elkady O.A. Effect of tungsten carbide (WC) on electrochemical corrosion behavior, hardness, and microstructure of CrFeCoNi high entropy alloy. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2022, vol. 69, p. 97. DOI: 10.1186/s44147-022-00097-1.
13. Zhang Y., Qiu N., Shen Z., Liu C., Zuo X. A novel strategy for architecting low interfacial energy transition phase to enhance thermal stability in a high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 947, p. 169570. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169570.
14. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1907. DOI: 10.3390/met11121907.
15. Polat G., Tekin M., Kotan H. Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 2022, p. 107589. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107589.
16. Astafurova E.G., Reunova K.A., Astafurov S.V., Astapov D.O. Temperature dependence of the deformation behavior of high-entropy alloys Co₂0Cr₂0Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀, Co₁₉Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₁, and Co₁₇Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₃. Mechanical properties and temperature dependence of yield strength. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2023, vol. 26, no. 6, pp. 5–16. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_6_5. (In Russian).
17. Qi Y., Cao T., Zong H., Wu Y., He L., Ding X., Jiang F., Jin S., Sha G., Sun J. Enhancement of strength-ductility balance of heavy Ti and Al alloyed FeCoNiCr high-entropy alloys via boron doping. *Journal of Materials Science and Technology*, 2020, vol. 75, pp. 154–166. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.023.
18. Xian X., Zhong Z.-H., Lin L.-J., Zhu Z.-X., Chen C., Wu Y.-C. Tailoring strength and ductility of high-entropy CrMnFeCoNi alloy by adding Al. *Rare Metals*, 2018, vol. 41, pp. 1015–1021. DOI: 10.1007/s12598-018-1161-4.
19. Wang C., Li T.-H., Liao Y.-C., Li C.-L., Jang J.S.-C., Hsueh C.-H. Hardness and strength enhancements of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with Nd doping. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, p. 38192. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138192.
20. Pengjie Z., Shuhuan W., Yukun L., Liansheng C., Kun L., Dingguo Z. Excellent plasticity of C and Mo alloyed TRIP high entropy alloy via rolling and heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 2145–2151. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.018.

21. Xu J., Duan R., Feng K., Zhang C., Liu P., Li Z. Enhanced strength and plasticity of selective laser melted NbMoTaW refractory high-entropy alloy via carbon microalloying. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4108454.
22. Yang G., Zhao Y., Lee D.-H., Park J.-M., Seok M.-Y., Suh J.-Y., Ramamurty U., Jang J.-I. Influence of hydrogen on incipient plasticity in CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 161, pp. 23–28. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.010.
23. Bai J., Wang Z., Zhang M., Qiao J. Effects of tailoring Zn additions on the microstructural evolution and electrical properties in GaInSnZn high-entropy alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2023, vol. 25, p. 2201831. DOI: 10.1002/adem.202201831.
24. Huang K., Wang G., Qing H., Chen Y., Guo H. Effect of Cu content on electrical resistivity, mechanical properties and corrosion resistance of AlCuNiTiZr_{0.75} high entropy alloy films. *Vacuum*, 2021, vol. 195, p. 110695. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110695.
25. Feng R., Rao Y., Liu C., Xie X., Yu D., Chen Y., Ghazisaeidi M., Ungar T., Wang H., An K., Liaw P.K. Enhancing fatigue life by ductile-transformable multicomponent B2 precipitates in a high-entropy alloy. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-021-23689-6.
26. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1907. DOI: 10.3390/met11121907.
27. Gromov V.E., Konovalov S.V., Peregudov O.A., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A. Coatings from high-entropy alloys: state and prospects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65 (10), pp. 683–692. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-10-683-692. (In Russian).
28. Chen Y., Munroe P., Xie Z., Zhang S. High-entropy alloy based coatings: microstructures and properties. *Protective thin coatings technology*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2021, pp. 205–232. DOI: 10.1201/9781003088349-6.
29. Jin G., Cai Z., Guan Y., Cui X., Liu Z., Li Y., Dong M., Zhang D. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 445, pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.03.135.
30. Li F., Cui W., Shao Y., Zhang J., Du S., Chen Z., Tian Z., Chen K., Liu G. Preparing high-entropy ceramic films from high-entropy alloy substrate. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 287, p. 126365. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126365.
31. Li B., Li H., Xia Y., Chen M., Wu Z., Tan X., Xu H. A novel magnetic FeCoNiCuAl high-entropy alloy film with excellent corrosion resistance. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4392421.
32. Lin C., Yao Y. Corrosion-resistant coating based on high-entropy alloys. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 205. DOI: 10.3390/met13020205.
33. Yurov V., Guchenko S., Mahanov K. Vysokoentropiinye pokrytiya FeCoCrNiMoTiW i ikh svoistva [FeCoCrNiMoTiW high-entropic coatings and their properties]. *Evrasiiskii soyuz uchenykh. Seriya: Tekhnicheskii i fiziko-matematicheskie nauki = Eurasian Union Scientists. Series: Technical and Physical and Mathematical Sciences*, 2021, no. 6 (87), pp. 12–16. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.87.1386.
34. Yurov V.M., Eremin E.N., Guchenko S. Microhardness and wear resistance of a high-entropy coating FeCrNiTiZrAl. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2182. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012083.
35. Wang X., Yao H., Yuan L., Chen L., Xu F., Tan Z., He D., Yang Y., Liu Y., Zhou Z. Novel candidate of metal-based thermal barrier coatings: high-entropy alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 474. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130087.
36. Fu Y., Dai C., Luo H., Li D., Du C., Li X. The corrosion behavior and film properties of Al-containing high-entropy alloys in acidic solutions. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 560. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.149854.
37. Xu Z., Wang Y., Gao X., Peng L., Qiao Q., Xiao J., Guo F., Wang R., Yu J. Electrochemical deposition and corrosion resistance characterization of FeCoNiCr high-entropy alloy coatings. *Coatings*, 2023, vol. 13, p. 1167. DOI: 10.3390/coatings13071167.
38. Chen X., Cui T., He S., Chang W., Shi Y., Lou Y. Effects of ultrasonic shot peening on the corrosion resistance and antibacterial properties of Al_{0.3}Cu_{0.5}CoCrFeNi high-entropy alloys. *Coatings*, 2023, vol. 13, p. 246. DOI: 10.3390/coatings13020246.
39. Liu K., Li X., Wang J., Zhang Y., Guo X., Wu S., Yu H. Investigation of mechanical and corrosion properties of light and high hardness cast AlTiVCrCu_{0.4} high entropy alloy. *Materials Characterization*, 2023, vol. 200. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112878.



40. Xue L., Ding Y., Pradeep K., Case R., Castaneda H., Paredes M. The grain size effect on corrosion property of $\text{Al}_2\text{Cr}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_{53}\text{Ni}_{35}$ high-entropy alloy in marine environment. *Corrosion Science*, 2022, vol. 208. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110625.
41. Zou Y., Li S., Liu S., Li J., Li Y. Improved mechanical and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy with cold rolling and post deformation annealing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 887. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161416.
42. Li N., Zhang H., Wu L., Li Z., Fu H., Ni D., Xue P., Liu F., Xiao B., Ma Z. Simultaneously increasing mechanical and corrosion properties in CoCrFeNiCu high entropy alloy via friction stir processing with an improved hemispherical convex tool. *Materials Characterization*, 2023, vol. 203. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113143.
43. Zhang W.-R., Liao W.-B., Liaw P.K., Ren J.-L., Brechtel J., Zhang Y. Effects of transient thermal shock on the microstructures and corrosion properties of a reduced activation high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 918. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165762.
44. Xiong W., Guo A.X., Zhan S., Liu C.T., Cao S.C. Refractory high-entropy alloys: a focused review of preparation methods and properties. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, vol. 142, pp. 196–215. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.08.046.
45. Haché M.J., Zou Y., Erb U. Thermal stability of electrodeposited nanostructured high-entropy alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2024, vol. 474, p. 130719. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130719.
46. Shivam V., Shadangi Y., Basu J., Mukhopadhyay N.K. Alloying behavior and thermal stability of mechanically alloyed nano AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy. *Journal of Materials Research*, 2019, vol. 34, pp. 787–795. DOI: 10.1557/jmr.2019.5.
47. Shahmir H., Nili-Ahmadabadi M., Shafie A., Langdon T. Hardening and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeNiMnTi high-entropy alloy processed by high-pressure torsion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 194. DOI: 10.1088/1757-899X/194/1/012017.
48. Bazlov A.I., Storchko I.V., Zanaeva E.N., Ubivovka E.V., Parkhomenko M.S., Milkova D.A., Bryukhanova V.V. Effect of replacing molybdenum with vanadium on the tendency to amorphization, structure and thermophysical properties of high-entropy alloys of the Fe–Co–Ni–Cr–(Mo,V) system. *Metallurgist*, 2024, vol. 67, pp. 1695–1704. DOI: 10.1007/s11015-024-01664-y. Translated from *Metallurg*, 2023, no. 11, pp. 86–92. DOI: 10.52351/00260827_2023_11_86.
49. Sun H., Liu T., Oka H., Hashimoto N., Cao Y., Luo R. Role of aging temperature on thermal stability of Co-free $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMn}_{1.3}\text{Ni}_{1.3}$ high-entropy alloy: decomposition and embrittlement at intermediate temperatures. *Materials Characterization*, 2024, vol. 210, p. 113804. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113804.
50. Liu X., Bai Z., Ding X., Yao J., Wang L., Su Y., Fan Z., Guo J. A novel lightweight refractory high-entropy alloy with high specific strength and intrinsic deformability. *Materials Letters*, 2020, vol. 287, p. 129255. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.129255.
51. Wei Q., Luo G., Tu R., Zhang J., Shen Q., Cui Y., Gui Y., Chiba A. High-temperature ultra-strength of dual-phase $\text{Re}_{0.5}\text{MoNbW}(\text{TaC})_{0.5}$ high-entropy alloy matrix composite. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 84, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.12.015.
52. Zhang H., Cai J., Geng J., Sun X., Zhao Y., Guo X., Li D. Development of high strength high plasticity refractory high entropy alloy based on Mo element optimization and advanced forming process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, vol. 112. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106163.
53. Panina E.S., Yurchenko N.Yu., Tozhibayev A., Zherebtsov S.V., Stepanov N.D. [High-entropy alloy based on the Co–Mo–Nb–Hf system with high strength at 1000 °C]. *Materialovedenie, formoobrazuyushchie tekhnologii i oborudovanie 2022 (ICMSSTE 2022)* [Materials Science, Shaping Technologies and Equipment 2022 (ICMSSTE 2022)]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Simferopol, 2022, pp. 128–134. (In Russian).
54. Pan Q., Zhang L., Feng R., Lu Q., An K., Chuang A.C., Poplawsky J.D., Liaw P.K., Lu L. Gradient cell-structured high-entropy alloy with exceptional strength and ductility. *Science*, 2021, vol. 374, pp. 984–989. DOI: 10.1126/science.abj8114.
55. Zhang B., Chen J., Wang P., Sun B., Cao Y. Enhanced strength-ductility of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with inverse gradient-grained structure prepared by laser surface heat-treatment technique. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 111, pp. 111–119. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.09.043.
56. Chen Y., Fang Y., Wang R., Tang Y., Bai S., Yu Q. Achieving high strength and ductility in high-entropy alloys via spinodal decomposition-induced compositional heterogeneity. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, vol. 141, pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.018.

57. Cai J., Zhang H., Wang L., Sun X., Xu X., Guo X., Li D. Design and coherent strengthening of ultra-high strength refractory high entropy alloys based on laser additive manufacturing. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4469753.
58. Jiang D., Xie L., Wang L. Current application status of multi-scale simulation and machine learning in research on high-entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, p. 1341. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.233.
59. Gromov B.E., Konovalov C.B., Chen C., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov B.B. Development vector for enhancement of Cantor HEA properties. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2023, no. 2 (44), pp. 3–12. DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-3-12. (In Russian).
60. Klimentov D., Stepanov N., Li J., Fang Q., Zharebtsov S. Machine learning-based strength prediction for refractory high-entropy alloys of the Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr system. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 7213. DOI: 10.3390/ma14237213.
61. Bhandari U., Rafi R., Zhang C., Yang S. Yield strength prediction of high-entropy alloys using machine learning. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 26, p. 101871. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101871.
62. Klimentov D.N., Yurchenko N.Y., Stepanov N.D., Zharebtsov S.V. Prediction of strength characteristics of high-entropy alloys Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr systems. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, p. 1535. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.145.
63. Li J., Fang Q. Investigation into plastic deformation and machining-induced subsurface damage of high-entropy alloys. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining*. Springer, 2019, pp. 23–52. DOI: 10.1007/978-981-13-3335-4_2.
64. Wu C., Li J., Qiu W., Lian F., Huang L., Zhu J., Chen L. Plasticity of CrMnFeCoNi high-entropy alloy via a purification mechanism. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4415770.
65. Hao J., Zhang Y., Wang Q., Ma Y., Sun L., Zhang Z. Enhanced plasticity in a Zr-Rich refractory high-entropy alloy via electron irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, vol. 590. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154876.
66. Li H., Cao F., Li T., Tan Y., Chen Y., Wang H., Liaw P.K., Dai L. Enhanced plasticity in refractory high-entropy alloy via multicomponent ceramic nanoparticle. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, vol. 194, pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.jmst.2024.01.030.
67. Chen Y.-Y., Hung S.-B., Wang C.-J., Wei W.-C., Lee J.-W. High temperature electrical properties and oxidation resistance of V-Nb-Mo-Ta-W high entropy alloy thin films. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 375, pp. 854–863. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.080.
68. Nong Z., Zhu J., Yang X., Yu H., Lai Z. Effects of annealing on microstructure, mechanical and electrical properties of AlCrCuFeMnTi high entropy alloy. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, 2013, vol. 28, pp. 1196–1200. DOI: 10.1007/s11595-013-0844-9.
69. Uporov S., Ryltsev R., Sidorov V., Estemirova S.K., Sterkhov E., Balyakin I., Chetelkatchev N. Pressure effects on electronic structure and electrical conductivity of TiZrHfNb high-entropy alloy. *Intermetallics*, 2022, vol. 140. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107394.
70. Xie J., Zhang S., Sun Y., Hao Y., An B., Li Q., Wang C.A. Microstructure and mechanical properties of high entropy CrMnFeCoNi alloy processed by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 795, p. 140004. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140004.
71. Karimi M., Shamanian M., Enayati M., Adamzadeh M., Imani M. Fabrication of a novel magnetic high entropy alloy with desirable mechanical properties by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 84, pp. 859–870. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.048.
72. Siddiqui D.N., Mehboob N., Zaman A., Alsuhailani A.M., Algahtani A., Tirth V., Alharthi S., Al-Shaalan N.H., Amin M.A. Effect of Cr-doping on the structural and magnetic properties of mechanically alloyed FeCoNi-AlMnCr high-entropy alloy powder. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, p. 19892. DOI: 10.1021/acsomega.3c01823.
73. Dong Z., Huang S., Ström V., Chai G., Varga L.K., Eriksson O., Vitos L. $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$ high entropy alloys for magnetocaloric refrigeration near room temperature. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 79, pp. 15–20. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.071.
74. Gromov V.E., Shlyarova Y.A., Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Perehudov O.A. Application of high-entropy alloys. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, p. 747. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754.
75. Suleimanova I.I., Ivanov M.A., Tingaev A.K., Trofimov E.A. [Prospects for application of high-entropy alloys for engineering at cryogenic temperatures]. *Sbornik trudov X Evraziiskogo simpoziuma po problemam prochnosti i resursa v usloviyakh klimaticheskikh nizkikh temperatur, posvyashchennyi 100-letiyu obrazovaniya YaASSR i 300-letiyu*



Rossiiskoi akademii nauk «EURASTRENCOLD-2022» [Proceedings of the X Eurasian Symposium on Problems of Strength and Lifetime under Climatically Low Temperatures, Dedicated to the 100th Anniversary of the Yakut ASSR and the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences “EURASTRENCOLD-2022”], Yakutsk, September 12–16, 2022. Kirov, 2022, pp. 418–422. (In Russian).

76. Kadyrmetov A.M., Popov D.A., Snyatkov E.V. Perspektivy primeneniya vysokoentropiinykh splavov dlya vosstanovleniya detalei mashin atmosferynym plazmennym napyleniem [Prospects for the use of high-entropy alloys for the restoration of machine parts by atmospheric plasma spraying]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin = World of Transport and Technological Machinery*, 2021, no. 1 (72), pp. 20–27. DOI: 10.33979/2073-7432-2021-72-1-20-27.

77. Pickering E.J., Carruthers A.W., Barron P.J., Middleburgh S.C., Armstrong D.E.J., Gandy A.S. High-entropy alloys for advanced nuclear applications. *Entropy*, 2021, vol. 23, p. 98. DOI: 10.3390/e23010098.

Conflicts of Interest

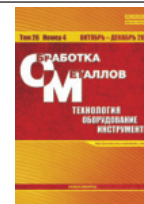
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Анализ изменения микроструктуры компрессионных колец вспомогательного судового двигателя

Елена Сюсюка^{1, a, *}, Елена Аминева^{1, b}, Юрий Кабиров^{2, c}, Наталья Пруцакова^{3, d}

¹ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация

² Южный федеральный университет, ул. Большая Садовая, 105/42, г. Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

³ Донской государственный технический университет, площадь Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Российская Федерация

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4237-0697>,  sollain66@rambler.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8965-9730>,  elika-11@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9975-3410>,  salv62@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-2761-286X>,  shpilevay@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 538.911 62–242

История статьи:

Поступила: 24 июня 2024

Рецензирование: 12 августа 2024

Принята к печати: 24 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Судовой двигатель

Надежность

Компрессионные кольца

Износ

Деформации

Микроструктура

Металлографические исследования

Текстурные неоднородности

Охрупчивание кристаллитов

Дифракция рентгеновских лучей

Макро- и микроструктура материала

Плотность дислокаций

Рентгеноструктурный анализ

Микронапряжения

Области когерентного рассеяния

АННОТАЦИЯ

Введение. Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания судового типа подвержена высоким эксплуатационным нагрузкам. От исправной работы цилиндрико-поршневой группы зависит надежность, долговечность и экономичность работы всего двигателя. Смена направления движений поршня и недостаточность смазки, обусловленная разбрызгиванием смазочного материала в процессе работы, приводят к повышенному износу движущегося пакета поршневых колец. Определив, под воздействием каких факторов и как меняется структура металла в процессе эксплуатации, можно учитывать эти факторы в технологии изготовления и упрочнения деталей. **Предмет исследований.** Объектами исследования являются отработавшие срок эксплуатации верхнее и нижнее компрессионные кольца цилиндрико-поршневой группы вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32. **Цель:** рассмотреть изменения структуры и микроструктуры материала компрессионных поршневых колец вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32, возникающие в результате эксплуатации; сравнить результаты оценки микронапряжений и деформаций поверхностного слоя деталей металлографическими методами и методом рентгеноструктурного анализа для различных условий работы верхнего и нижнего компрессионного кольца. **Методы.** В исследовании применены металлографический и рентгеновские методы. Описаны условия рентгеновской съемки; рентгеноструктурный анализ проведен на дифрактометре «Дрон-3М». Определены остаточные микродеформации, а также размеры областей когерентного рассеяния (D) и плотность дислокаций на поверхностях образцов. **Результаты работы.** Представлены результаты металлографического и рентгеноструктурного анализа (PCA). Определены остаточные макро- (σ_0) и микронапряжения, а также размеры областей когерентного рассеяния (D) поверхностного слоя компрессионных колец. Результаты рентгеноструктурного анализа сопоставимы с результатами металлографических исследований, прослеживается сходимость результатов. **Область применения результатов.** Результаты исследования могут применяться при подборе технологии изготовления компрессионных колец судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС). **Выводы.** Целесообразно проводить оценку изменения проявлений напряженного состояния чугуна при воздействии различных факторов. Это позволит подобрать оптимальную технологию изготовления компрессионных колец для обеспечения надежности их эксплуатации. Контроль качества колец различными методами оценки структуры также дает возможность прогнозирования условий разрушения компрессионных колец в процессе эксплуатации. Увеличение степени дефектности верхнего кольца происходит вследствие различного рода деформаций кристаллитов. В результате неупругих деформаций при работе кольца рождающиеся дислокации вызывают сильные механические напряжения.

Для цитирования: Анализ изменения микроструктуры компрессионных колец вспомогательного судового двигателя / Е.Н. Сюсюка, Е.Х. Аминева, Ю.В. Кабиров, Н.В. Пруцакова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 180–191. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-180-191.

Введение

Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) внутреннего сгорания судового типа подвержена высоким эксплуатационным нагрузкам. От исправной работы ЦПГ зависит надежность, долговечность и экономичность работы всего двигателя. Смена направления движений поршня и недостаточ-

*Адрес для переписки

Сюсюка Елена Николаевна, к.т.н., доцент

Государственный морской университет

им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,

пр. Ленина, 93,

353924, г. Новороссийск, Российская Федерация

Тел.: +7 918 4478192, e-mail: sollain66@rambler.ru

ность смазки, обусловленная разбрызгиванием смазочного материала в процессе работы, приводят к повышенному износу движущегося пакета поршневых колец, находящихся в верхней части цилиндра [1].

В состав ЦПГ входят компрессионные и маслосъемные кольца. Маслосъемные кольца используются в четырехтактных двигателях с системой разбрызгивания смазывающего материала для снятия излишков масла в нижней части цилиндра и регулирования его поступления на верхнюю часть цилиндра. Компрессионные кольца выполняют две функции: уплотнительную и теплоотводящую, а также способствуют распределению масла по стенкам цилиндра во время работы. В процессе работы компрессионные кольца совершают несколько видов движения. *Прямое-обратное (радиальное)* движение колец внутри кепа (канавки под кольцо на цилиндрической поверхности поршня) создает деформации, перпендикулярные образующей, и способствуют износу и колец, и нижней поверхности кепа. Это приводит к ухудшению уплотняющего действия компрессионных колец, а после – к радиальной вибрации и поломке кольца, чаще всего в средней части, напротив замка. *Осевое* перемещение происходит из-за разницы давлений газов над кольцом и под ним, силы тяжести самого кольца и силы трения между кольцом и поверхностью кепа. *Вращательное* движение колец обусловлено оборотами вала двигателя.

Условия работы верхнего и нижнего компрессионного кольца отличаются. Давление за верхним компрессионным кольцом составляет $0,75Pr$, за нижним компрессионным кольцом – $0,20Pr$ (Pr – рабочее давление). Это давление является одной из составляющих силы прижатия колец к цилиндру, а также создает радиальные деформации материала колец, что обуславливает повышенный износ верхнего компрессионного кольца и нижней поверхности кепа, на который осуществляется его посадка.

Срок работы ЦПГ сильно зависит от скорости изнашивания компрессионных колец. С целью повышения срока службы поршневых колец разработаны различные методики упрочнения сопрягаемых поверхностей: пластическое деформирование, закалка токами высокой частоты, создание адгезионных поверхностей, постановка в зоне трения кольца в верхней мертвой точке

износостойких вставок, пористое хромирование, протачивание канавок для заливки оловом, а также нанесение упрочняющих покрытий из молибдена и других материалов, повышающих триботехнические свойства [2, 3].

Из основных конструкционных требований к кольцам выделяются высокие прочность, упругость, износостойкость и малый коэффициент трения. Большое значение имеет равномерное распределение радиального давления по окружности кольца [4].

Поршневые кольца изготавливаются из серого легированного чугуна с пластинчатым графитом или высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Серый чугун наряду с высокими литейными свойствами имеет хорошую демпфирующую способность, высокие антифрикционные свойства и меньшую склонность к термическим деформациям по сравнению со сталью. Различия фазовых состояний серых чугунов, диффузия элементов, неоднородность коэффициентов линейного и объемного расширения феррита, цементита и графита приводят к анизотропии напряженного состояния. Это является источником зарождения и развития дефектов – дислокаций.

Представляется целесообразным оценивать изменение проявлений напряженного состояния чугуна при воздействии различных факторов с целью прогнозирования условий разрушения компрессионных колец в процессе эксплуатации. Технология изготовления компрессионных колец определяется требованиями надежности и описана в соответствующих стандартах для каждого вида колец. Контроль качества колец осуществляется различными методами оценки структуры отливок с учетом технологии заковки, нормализации, термической и механической обработки [1–5].

Использование серого чугуна для изготовления компрессионных колец обусловлено его хорошей жидкотекучестью и малой усадкой. Механические свойства чугуна определяются количественным соотношением структурных составляющих, в основном феррита, перлита и графита. Чугун с перлитной основой наиболее прочен и изнаноустойчив. Феррит снижает механические свойства чугуна. Крупные включения графита снижают прочность, но обеспечивают высокую циклическую вязкость и низкую чувствительность к внешним надразам. В процес-

се эксплуатации структуры материала верхнего и нижнего колец претерпевают значительные изменения. Кольца, изготовленные из серого легированного чугуна с пластинчатым графитом, должны иметь определенную микроструктуру: металлическая основа состоит из средне- и мелкопластинчатого или сорбитообразного перлита. Перлит соответствует высокой твердости, износостойкости и хорошей обрабатываемости резанием. Наличие феррита в виде отдельных мелких включений не должно превышать 5 % площади шлифа. Феррит свидетельствует о снижении механических свойств и износостойкости чугуна. Неструктурный цементит не допускается. Фосфидная эвтектика может присутствовать в виде мелких равномерных включений или разорванных сеток, при этом тройная фосфидная эвтектика с пластинками не допускается [6].

Появление в структуре цементита приводит к хрупкости [7, 8]. Согласно ГОСТ 7133–80 кольца, изготовленные из чугуна с шаровидным графитом в качестве металлической основы, должны содержать тонко-, мелко- и среднепластинчатый перлит или сорбитообразный перлит. Процентное содержание цементита в виде мелких включений не должно превышать 10 %, для феррита – не более 10 % площади шлифа.

Существуют методики оптико-математического метода описания металлографических изображений, позволяющие оценить процентное содержание включений различных фаз высокохромистого чугуна [9].

Проблема повышения надежности ЦПГ может быть решена путем всесторонних исследований возможных эксплуатационных изменений материалов с применением современной испытательной, исследовательской техники и аналитических программ. При любом динамическом и тепловом воздействии на кольца в процессе эксплуатации внутренняя структура материала изменяется, а зона пластической деформации приобретает характерные особенности. Это подтверждается послойным текстурным анализом металла в области хрупких изломов для недеформированного нового образца и образца с дефектами после эксплуатации [10].

Увеличение плотности дислокаций, изменение микроструктуры и возможное появление

текстурных неоднородностей можно исследовать, применяя металлографические методы и дифракцию рентгеновских и электронных лучей [11–14].

Анализ литературы по данной тематике позволяет сделать выводы о взаимосвязи изменений структуры и эксплуатационных свойств материала.

В работе [15] исследователи выяснили, что при изменении материала рабочих органов погружных насосов из чугуна, когда пластинчатая форма включений графита меняется на шаровидную, существенно улучшаются такие эксплуатационные характеристики чугуна, как прочность и пластичность, но проявляется повышенная объемная усадка и ухудшается жидкотекучесть. Эти факторы необходимо учитывать при подборе технологии изготовления компрессионных колец.

Прослеживается похожий характер влияния изменения микроструктуры на свойства материала для чугунов и для сталей. Анализ изменений микроструктуры и кристаллографической текстуры ферритной стали при коррозионном разрушении под нагрузкой (КРН) с помощью растровой электронной микроскопии позволил установить размер и тип нематаллических включений, элементный состав продуктов коррозии, а также характер разрушения в зоне действия КРН [16]. В рамках рентгеноструктурного анализа (РСА), при котором учитывали форму и размер зерен-кристаллитов, кристаллографическую текстуру, заселенность кристаллической решетки атомами, атомные смещения, фактор Дебая – Уоллера и инструментальное уширение линий, были оценены параметры тонкой структуры ферритной стали в зоне разрушения и в свободной от КРН зоне. Показано, что область разрушения характеризуется высокой плотностью внесенных дислокаций краевого типа, сильными упругими искажениями кристаллической решетки и относительно малым размером областей когерентного рассеяния (ОКР).

Множество исследований различных видов стали показывает, что с повышением скорости деформации при высоких температурах увеличивается пороговая деформация, возникающая перед началом динамической рекристаллизации аустенита. При использовании микролегирова-

ния бором наблюдается обратный эффект – пороговая деформация уменьшается. Наличие бора в растворе способствует образованию зерен на границах, что препятствует перестройкам атомов и облегчает миграцию этих зерен. Быстрая динамическая рекристаллизация улучшает пластичность стали и способствует измельчению, что снижает ее хрупкость [17, 18].

Интересно также изучение воздействия на напряженно-деформированного состояния на распространение трещин в квазисколах стали, подверженной охрупчиванию из-за наличия водорода. Исследовалась роль водорода в механизме распространения трещин, и было установлено, что путь трещин в квазисколах в охрупченных водородом ферритных и ферритно-перлитных низкоуглеродистых сталях определяется в большей степени характером напряженно-деформированного состояния, чем микроструктурой или кристаллографической ориентацией отдельных зерен [19].

Существуют новые технологии производства стальных поршневых колец, которые предусматривают шлифование поверхности [20] и нанесение износостойких покрытий, например разработанный метод трехслойного упрочнения их поверхности. Этот метод включает в себя карбонитрацию, ионную имплантацию нитрида титана, а затем сульфидирование, что приводит к улучшенной обработке и повышенной износостойкости поршневых колец [21]. Очень эффективным в упрочнении поршневых колец может оказаться метод электроакустического напыления [22]. Получающееся при таком способе нанесения нанокристаллическое покрытие на поверхности металла менее подвержено релаксации, что позволяет в 6...8 раз увеличить ресурс работы детали.

Цели исследования: рассмотреть изменения структуры и микроструктуры материала верхнего и нижнего компрессионных поршневых колец вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32, возникающие в результате эксплуатации этих колец в различных условиях и при различных нагрузках; сравнить микронапряжения, возникающие вследствие деформаций поверхностного слоя верхнего и нижнего компрессионных колец, используя металлографические методы и метод рентгеноструктурного анализа.

Методика исследований

Предметами исследования являются отработавшие срок эксплуатации поршневые компрессионные кольца (верхнее и нижнее) вспомогательного судового двигателя HIMSEN 4H21/32.

Существующие методики металлографических исследований и рентгеновской дифрактометрии [14–24] позволяют исследовать напряженное состояние и атомную структуру, микродеформации, а также разброс размеров частиц материала.

В настоящем исследовании для изучения микроструктуры компрессионных колец были использованы металлографический и рентгеновские методы.

Изменение структуры материала верхнего кольца при износе, вызванном различиями в условиях эксплуатации верхнего и нижнего компрессионных колец, приводит к потере подвижности нижнего кольца. Это означает, что всю тепловую и механическую нагрузку несет горячий резерв верхнего кольца. Анализ изменения структуры материала верхнего и нижнего колец позволит подтвердить различия в динамических и тепловых воздействиях на материал в процессе эксплуатации, что позволит определить технологические параметры для изготовления колец и их специального упрочнения.

Образцы для приготовления шлифов с целью определения микроструктуры и фазового состава материала сделаны методом порезки перпендикулярно образующей кольца (рис. 1). Поскольку динамические и тепловые нагрузки равновероятны по всем радиальным направлениям в плоскости кольца, то место пореза особого значения не имеет. При наличии возможного разлома или трещины место пореза должно соседствовать с дефектом.

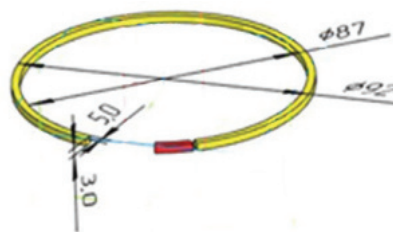


Рис. 1. Схема порезки кольца

Fig. 1. Ring cutting pattern

Подготовка микрошлифа для проведения металлографических исследований проводилась в соответствии с методикой, определенной ГОСТ.

Для выявления всей микроструктуры выполнялось травление шлифа раствором нитрата (4%-го спиртового раствора HNO_3) в течение одной минуты. Качество травления контролировалось с помощью металлографического микроскопа ММН-2. С помощью этого же микроскопа были получены фотографии микроструктуры шлифов поперечного среза колец (рис. 2, 3).

Рентгеноструктурные исследования при комнатной температуре проводились на дифрактометре «Дрон-3М». Съемка дифракционных профилей велась по геометрии Брэгга – Брентано на $\text{CuK}\alpha$ -излучении с длиной волны $1,5406 \text{ \AA}$ (среднее значение длины волны $\text{K}\alpha_{1,2}$ меди, обычно используемое для обработки рентгенограмм) в интервале углов $20^\circ < 2\theta < 90^\circ$ с шагом сканирования $0,02^\circ$ и временем набора импульсов в каждой точке $t = 2 \text{ с}$. Дифракционные профили компрессионных колец обрабатывались с помощью компьютерной программы PowderCell версии 2.3, для анализа и уточнения структурных характеристик использовалась база данных ICSD. Отметим, что значительный фон на рентгенограммах связан с флуоресценцией железа при возбуждении его атомов излучением $\text{K}\alpha$ меди.

Определены параметры решетки, размеры областей когерентного рассеяния на поверхностях образцов, а также микроискажения (микродеформации) решетки и плотность дислокаций.

Для оценки эффективных размеров D областей когерентного рассеяния (блоков мозаики) использовалась формула Селякова – Шеррера [23]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от формы частиц и близкий к единице; λ – длина волны излучения; β – полуширина дифракционного отражения; θ – угол дифракции.

Плотность дислокаций ρ_D [24] была рассчитана по эффективным размерам кристаллитов согласно формуле

$$\rho_D = 3D^{-2}. \quad (2)$$

Оценка размеров областей когерентного рассеяния D проводилась по наиболее интенсивному дифракционному отражению 110, лежащему

в области небольших углов 2θ . Для него можно не учитывать уширение отражений, вызванное дублетом $\text{K}\alpha_1$ - $\text{K}\alpha_2$, существенное на больших углах дифракции.

Вклад в уширение дифракционных линий из-за микродеформаций также присутствует; относительную деформацию решетки $\frac{\Delta d}{d}$ [25] определяли по формуле

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\beta}{4\text{tg}\theta}. \quad (3)$$

Проведенное разделение вкладов микронапряжений и измельчения кристаллитов в уширение дифракционных отражений показало, что основное влияние на уширение отражений оказывают микродеформации.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура недеформированных колец, не подвергшихся эксплуатации (рис. 2, а), состоит из включений графита и перлитной матрицы. Кроме этого, на микроструктуре видно небольшое количество зерен феррита, но их количество невелико – около 5 %. Фотографии микроструктуры (рис. 2, б и 3) поперечных шлифов отработавших эксплуатационный срок компрессионных колец указывают на соответствие мелкопластинчатой перлитной основы чугуна с незначительным (не более 5 %) включением ферритных зёрен [6, 9, 11]. Это отвечает международным стандартам для компрессионных колец. Схемы допустимых для материала компрессионных колец структур подбирались согласно ГОСТ 3443–87 (Межгосударственный стандарт «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры») [6].

Первая фотография представляет микроструктуру верхнего компрессионного кольца и показывает наличие пластинчатого цементита: основой является мелкопластинчатый перлит с незначительным включением ферритных зерен; наличие некоторого количества элементов цементита говорит об увеличенной хрупкости этого материала. Измеренная твердость материала кольца по Бринелю составляет HB135 (регламентируемая для компрессионных колец судовых ДВС данного размера – 92...102). Увеличение твердости сопровождается большей хрупкостью

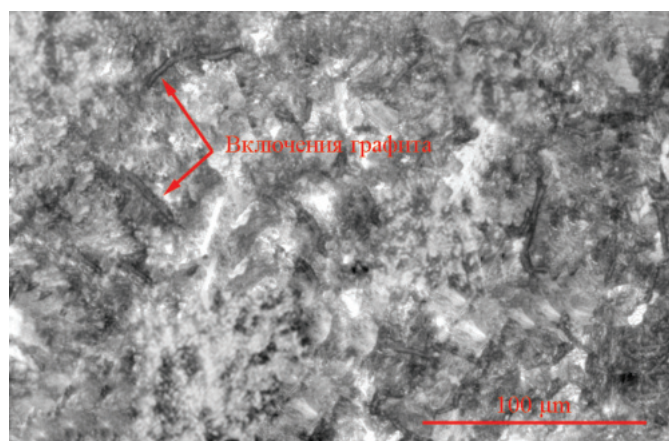
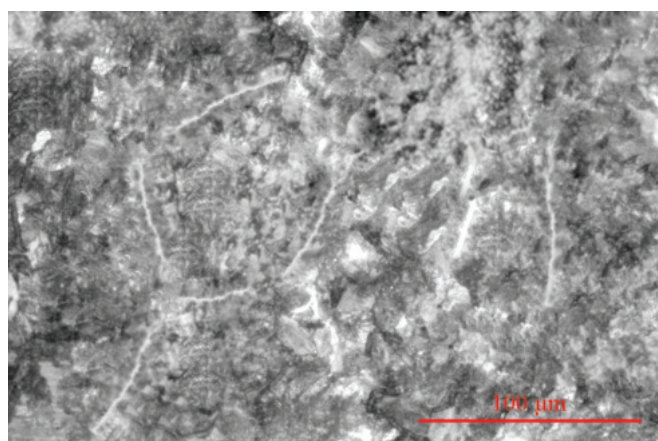
*a**б*

Рис. 2. Фотография микроструктуры верхнего компрессионного кольца:
a – до деформации в ходе эксплуатации; *б* – после деформации в ходе эксплуатации

Fig. 2. Photo of the microstructure of the upper compression ring:
a – before deformation during operation; *б* – after deformation during operation

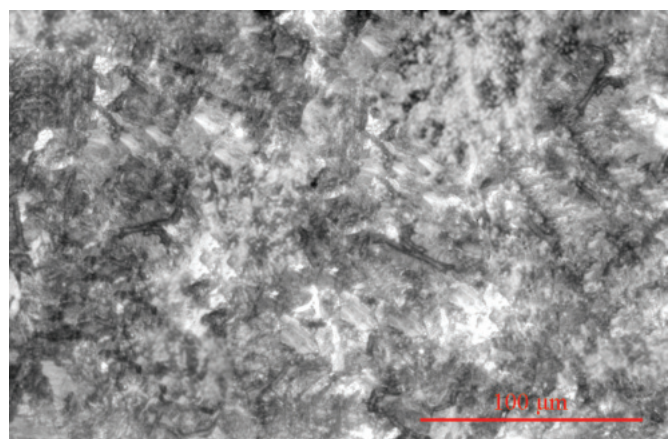


Рис. 3. Фотография микроструктуры нижнего компрессионного кольца

Fig. 3. Photo of the microstructure of the lower compression ring

материала. Вторая фотография представляет микроструктуру нижнего компрессионного кольца: первичной основой является перлит с включениями мелкозернистого феррита. Твердость материала нижнего компрессионного кольца составляет менее HB85. Нижнее кольцо подвергается меньшему температурному воздействию, поэтому структурные изменения здесь существенно ниже. Однако циклические нагрузки и деформационное воздействие приводят к образованию усталостных трещин и снижению механических характеристик.

Включения цементита верхнего компрессионного кольца занимают большую площадь, чем

включения цементита нижнего компрессионного кольца. Это указывает на более значительные механические и тепловые нагрузки на верхнее кольцо. Согласно микрофотографическим снимкам в наиболее нагруженном материале также наблюдается измельчение микросталлитов, что коррелирует с данными рентгеновской дифракции. Результаты обработки данных рентгеновской дифракции приведены в таблице.

На рис. 4, *a*, *б* показаны фрагменты рентгенограмм поверхностей нижнего (*a*) и верхнего (*б*) компрессионных колец. Как показали рентгеноструктурные исследования (см. таблицу), в верхнем компрессионном кольце по сравнению с нижним кольцом наблюдается увеличение плотности дислокаций (приблизительно на 60 %), а также большие величины микродеформаций решетки (приблизительно на 30 %). Кроме того, в верхнем компрессионном кольце имеет место большее измельчение областей когерентного рассеяния (среднего размера областей совершенства *D*), примерно на 20 %, что в эксперименте соответствует большим значениям полуширин рентгеновских отражений (рис. 4) и некоторому увеличению параметров ячейки.

Выводы

В работе методами рентгеновской дифракции и металлографического анализа экспериментально установлены изменения структуры,

Результаты обработки данных рентгеновской дифракции

Results of X-ray diffraction data processing

Фаза	a , Å	V , Å ³	hkl	2θ	β , град	D , Å	Плотность дислокаций ρ_D , см ⁻²	Микроискажения решетки $\Delta d/d$
Fe, нижнее кольцо	2,8785	23,9	110	44,20	0,5	180	$9,3 \cdot 10^{11}$	0,00758
Fe, верхнее кольцо	2,8870	24,1	110	44,07	0,63	142	$14,8 \cdot 10^{11}$	0,00998

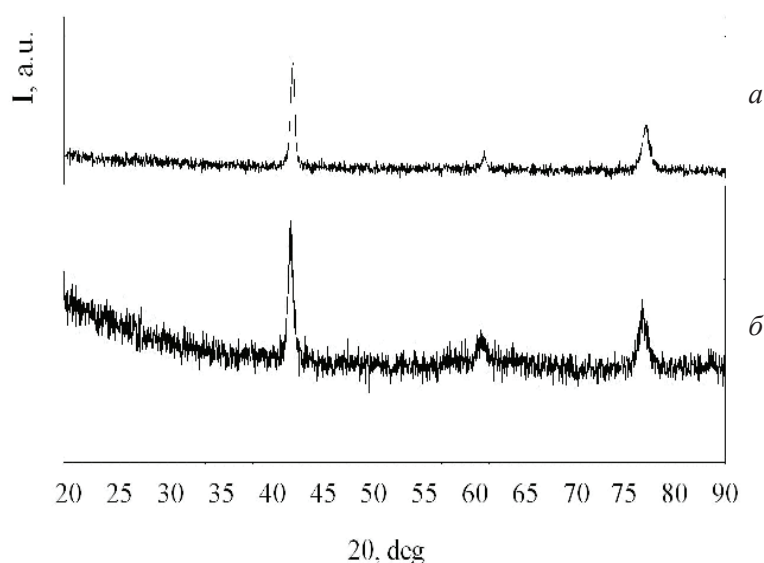


Рис. 4. Рентгенограммы поверхностей нижнего (а) и верхнего (б) компрессионных колец

Fig. 4. X-ray patterns of the surfaces of the lower (a) and upper (b) compression rings

микроструктуры и твердости материала компрессионных поршневых колец вспомогательного судового двигателя HIMSSEN 4H21/32, возникающие в результате эксплуатации.

Установлено различие полуширин рентгеновских дифракционных отражений железа в материале верхнего компрессионного кольца по сравнению с нижним, что свидетельствует об уменьшении среднего размера областей когерентного рассеяния в связи с различными условиями эксплуатации колец. При этом наблюдается различие в плотности дислокаций в 1,6 раза, она составляет $9,3 \cdot 10^{11}$ см⁻² для нижнего компрессионного кольца и $14,8 \cdot 10^{11}$ см⁻² для верхнего компрессионного кольца. Установлено также различие в величинах микродеформаций для двух колец: для нижнего компресси-

онного кольца они выше примерно в 1,3 раза. Следует отметить увеличенные значения параметров кристаллической решетки железа для верхнего кольца по сравнению с нижним.

Таким образом, результаты металлографического и рентгеновского анализа свидетельствуют о большей степени дефектности верхнего компрессионного кольца по сравнению с нижним вследствие большего измельчения микрокристаллитов и появления более сильных напряжений из-за рождающихся дислокаций и неупругих деформаций при работе кольца.

Из полученных результатов следует, что для повышения долговечности и устойчивости работы колец необходимо упрочнение самого материала колец, а также поверхностей этих колец. Целесообразным представляется оценивать из-



менения проявлений напряженного состояния чугуна при воздействии различных факторов. Это позволит подобрать оптимальную технологию изготовления компрессионных колец для обеспечения надежности их работы. Контроль качества колец с использованием различных методов также позволяет прогнозировать условия, в которых могут произойти повреждения компрессионных колец во время эксплуатации.

Список литературы

1. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета, испытаний. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 288 с.
2. Исследование эффективности использования слоистого модификатора трения в цилиндро-поршневой группе судового дизельного двигателя / И.Н. Гужвенко, В.А. Чанчиков, Н.В. Прямухина, Е.А. Стринжа // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 3-1 (41). – С. 135–142.
3. Тейлор Д.А. Основы судовой техники. – М.: Транспорт, 1987. – 320 с.
4. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Т. 1. – М.: Моркнига, 2010. – 260 с.
5. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 4 (17). – С. 141–150. – EDN YPQCXS.
6. Martyushev N.V., Pashkov E.N. Bronze sealing rings defects and ways of its elimination // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 82–86. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.82.
7. Анисович А.Г., Андрушевич А.А. Микроструктуры черных и цветных металлов. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 131 с. – ISBN 978-985-08-1883-6.
8. Структурообразование высокохромистых чугунов в интервале температур магнитного превращения карбидных фаз / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин, А.И. Сидашенко, В.К. Аветисян // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 129–134. – DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-129-134. – EDN JXWBPД.
9. A methodological approach to the simulation of a ship's electric power system / I.P. Boychuk, A.V. Grinek, N.V. Martyushev, R.V. Klyuev, B.V. Malozyomov, V.S. Tynchenko, V.A. Kukartsev, Y.A. Tynchenko, S.I. Kondratiev // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 8101. – DOI: 10.3390/en16248101.
10. Клевцов Г.В., Перлович Ю.А., Фесенко В.А. К развитию рентгеновского метода идентификации изломов с испорченной поверхностью // Заводская лаборатория. – 1993. – Т. 59, № 8. – С. 34–37.
11. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с. – ISBN 5-94836-018-0.
12. The resource efficiency assessment technique for the foundry production / I.G. Vidayev, N. Martyushev, A.S. Ivashutenko, A.M. Bogdan // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 141–145. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.
13. Сюсюка Е.Н., Савченко М.М. Дифрактометрические методы анализа судовых технических средств // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 4 (101). – С. 148–151. – DOI: 10.34046/aumsomt101/22. – EDN PTUQBC.
14. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022. – EDN HXFODE.
15. Новый метод изготовления рабочих органов погружных центробежных насосов из аустенитного чугуна с шаровидным графитом / Н.С. Гушин, Е.В. Ковалевич, Л.А. Петров, Е.С. Пестов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2008. – № 4 (24). – С. 44–48. – EDN JVCWUF.
16. Microstructure and crystallographic structure of ferrate steel subject to stress corrosion cracking / V.D. Sitdikov†, A.A. Nikolaev, G.V. Ivanov, A.K. Makatrov, A.V. Malinin // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 65–70. – DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-65-70. – EDN EGVNMD.
17. Kniazuk T.V., Zisman A.A. Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 71–75. – DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-71-75. – EDN SCNCMW.
18. Влияние напряженно-деформированного состояния на путь распространения трещин квазисколла в низкоуглеродистой стали, охрупченной водородом / Е.Д. Мерсон, В.А. Полуянов, П.Н. Мягих, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 298–303. – DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-298-303. – EDN DUKKFP.
19. Оханкин К.А., Кудрявцев А.С. Исследование влияния длительной высокотемпературной эксплуатации на структуру и свойства аустенитной хромоникельмолибденовой стали // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 21–26. – DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-21-26. – EDN LNFVNV.
20. Околович Г.А., Карпов С.В., Ларещева О.С. Новые технологии в производстве стальных поршневых

вых колец // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – № 2 (23). – С. 27–28. – EDN NKADLT.

21. Технология нанесения износостойкого покрытия стальных поршневых колец / Г.А. Околович, А.М. Гурьев, В.Н. Шабалин, А.Е. Сизова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 50–52. – EDN PUJQFJ.

22. Nekrasova T.V., Melnikov A.G. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 77–81. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

23. Morphological features of polycrystalline $CdS_{1-x}Se_x$ films obtained by screen-printing method / D.M. Strateichuk, N.V. Martyushev, R.V. Kly-

uev, V.A. Gladkikh, V.V. Kukartsev, Y.A. Tynchenko, A.I. Karlina // Crystals. – 2023. – Vol. 13. – P. 825. – DOI: 10.3390/cryst13050825.

24. Васильев Д.М., Смирнов Б.И. Некоторые рентгенографические методы изучения пластически деформированных металлов // Успехи физических наук. – 1961. – Т. 73, вып. 3. – С. 503–558.

25. Bosikov I.I., Ereemeeva S.V., Karlina A.I. Complex assessment of X-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice // Crystals. – 2023. – Vol. 13. – P. 528. – DOI: 10.3390/cryst13030528.

26. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 912–916. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 -

Metal Working and Material Science

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



Analysis of changes in the microstructure of compression rings of an auxiliary marine engine

Elena Syusyuka^{1, a, *}, Elena Amineva^{1, b}, Yuri Kabirot^{2, c}, Natalia Prutsakova^{3, d}

¹ Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

² South Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya str., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

³ Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4237-0697>,  sollain66@rambler.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8965-9730>,  elika-11@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9975-3410>,  solv62@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-2761-286X>,  shpilevay@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 June 2024

Revised: 12 August 2024

Accepted: 24 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Marine engine

Reliability

Compression rings

Wear

Deformations

Microstructure

Metallographic studies

Textural inhomogeneities

Embrittlement of crystallites

X-ray diffraction

Macro- and microstructure

of the material

Dislocation density

Phase analysis

Microstresses

Coherent scattering regions

ABSTRACT

Introduction. The cylinder-piston group (CPG) of a marine-type internal combustion engine is subjected to high operational loads. The reliability, durability and efficiency of the engine depend on the proper operation of the CPG. The change in the direction of piston movement and the lack of lubrication caused by the spraying of lubricant during operation, lead to increased wear of the moving package of piston rings. Having determined the factors influencing the changes in the structure of the metal during operation, it can be taken into account in the manufacturing technology and hardening of these parts. **The subject of the study:** the object of research is the used-out upper and lower compression rings of the cylinder-piston group of the *HIMSEN 4H21/32* auxiliary marine engine. **Purpose of the work** is to consider the change in the structure and microstructure of the material of the compression piston rings of the *HIMSEN 4H21/32* auxiliary marine engine arising as a result of operation; to compare the results of evaluating microstresses and deformations of the surface layer of parts by metallographic methods and X-ray diffraction analysis for various operating conditions of the upper and lower compression rings. **Methods.** Metallographic and X-ray methods were used in the study. The conditions of X-ray photography are described; X-ray diffraction analysis was carried out on a *Dron-3M* diffractometer. Residual microdeformations were determined, as well as the sizes of coherent scattering regions (*D*) and the density of dislocations on the surfaces of the samples. **Results of the work.** The results of metallographic and X-ray diffraction analysis (*XRD*) are presented. The residual macro- and microstresses and the sizes of the coherent scattering regions (*D*) of the surface layer of compression rings are determined. The results of X-ray diffraction analysis are comparable with the results of metallographic studies, and the convergence of the results is observed. **Scope of the results application:** the results of the study can be used in the selection of manufacturing technology for compression rings of marine internal combustion engines (*MICE*). **Conclusions.** It is advisable to evaluate changes in the manifestations of the stress state of cast iron under the influence of various factors. This will allow selecting the optimal technology for manufacturing compression rings to ensure the reliability of its operation. Ring quality control by various methods of structure assessment also makes it possible to predict the conditions of destruction of compression rings during operation. An increase in the degree of defectiveness of the upper ring occurs due to various kinds of deformations of the crystallites. As a result of inelastic deformations during ring operation, the resulting dislocations cause strong mechanical stresses.

For citation: Syusyuka E.N., Amineva E.H., Kabirot Yu.V., Prutsakova N.V. Analysis of changes in the microstructure of compression rings of an auxiliary marine engine. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 180–191. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-180-191. (In Russian).

References

1. Putintsev S.V. *Mekhanicheskie poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nye glavy konstruirovaniya, rascheta, ispytaniy* [Mechanical losses in piston engines: special chapters of design, calculation, testing]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 288 p.

* Corresponding author

Syusyuka Elena N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Admiral Ushakov State Maritime University,
 93, Lenin Ave.,
 353924, Novorossiysk, Russian Federation
 Tel.: +7 918 4478192, e-mail: sollain66@rambler.ru

2. Guzhvenko I.N., Chanchikov V.A., Pryamukhina N.V., Strinzha E.A. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya sloistogo modifikatora treniya v tsilindroporshnevoi gruppe sudovogo dizel'nogo dvigatelya [Researching of the efficiency of the use of a layer frequency modulator in the cylinder-piston group of the ship diesel engine]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2018, vol. 3-1 (41), pp. 135–142.
3. Taylor D.A. *Introduction to marine engineering*. London, Boston, Butterworths, 1990 (Russ. ed.: Teilor D.A. *Osnovy sudovoi tekhniki*. Moscow, Transport Publ., 1987. 320 p.).
4. Voznitskii I.V., Punda A.S. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. T. 1 [Marine internal combustion engines. Vol. 1]. Moscow, Morkniga Publ., 2010. 260 p.
5. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Klochko O.Yu., Saychuk A.V., Rybalko I.N. Otsenka lokal'noi strukturnoi neodnorodnosti v otlivkakh iz serogo chuguna [Evaluation of local structural inhomogeneity in castings from the grey cast-iron]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2017, vol. 4 (17), pp. 141–150. (In Russian).
6. Martyushev N.V., Pashkov E.N. Bronze sealing rings defects and ways of its elimination. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 82–86. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.82.
7. Anisovich A.G., Andrushevich A.A. *Mikrostruktury chernykh i tsvetnykh metallov* [Microstructures of ferrous and non-ferrous metals]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 131 p. ISBN 978-985-08-1883-6.
8. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L., Sidashenko A.I., Avetisyan V.K. Strukturoobrazovanie vysokokhromistykh chugunov v intervale temperatur magnitnogo prevrashcheniya karbidnykh faz [Structure formation of high-chromium cast irons in the temperature range of magnetic transformation of carbide phases]. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2020, vol. 10 (2), pp. 129–134. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-129-134.
9. Boychuk I.P., Grinek A.V., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A., Kondratiev S.I. A methodological approach to the simulation of a ship's electric power system. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 8101. DOI: 10.3390/en16248101.
10. Klevtsov G.V., Perlovich Yu.A., Fesenko V.A. K razvitiyu rentgenovskogo metoda identifikatsii izlomov s isporchennoi poverkhnost'yu [Towards the development of an X-ray method for identifying fractures with a damaged surface]. *Zavodskaya laboratoriya = Industrial Laboratory*, 1993, vol. 59, no. 8, pp. 34–37.
11. Brandon D., Kaplan W.D. *Microstructural characterization of materials*. Chichester, New York, J. Wiley, 1999 (Russ. ed.: Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 384 p. ISBN 5-94836-018-0).
12. Vidayev I.G., Martyushev N., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.
13. Syusyuka E.N., Savchenko M.M. Difraktometricheskie metody analiza sudovykh tekhnicheskikh sredstv [Diffraction methods of analysis of ship technical means]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta = Operation of marine transport*, 2021, no. 4 (101), pp. 148–151. DOI: 10.34046/aumsuomt101/22.
14. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.
15. Gutschin N.S., Kovalevich E.V., Petrov L.A., Pestov E.S. Novyi metod izgotovleniya rabochikh organov pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosov iz austenitnogo chuguna s sharovidnym grafitom [The new method of operating element production of the sinking rotary pumps made of austenitic iron with spherical graphite]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*, 2008, no. 4 (24), pp. 44–48.
16. Sitdikov V.D., Nikolaev A.A., Ivanov G.V., Makatrov A.K., Malinin A.V. Microstructure and crystallographic structure of ferrite steel subject to stress corrosion cracking. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2022, vol. 12 (1), pp. 65–70. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-65-70.
17. Kniazuk T.V., Zisman A.A. Abnormal effect of strain rate on dynamic recrystallization of austenite in medium carbon steel alloyed by boron. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2022, vol. 12 (1), pp. 71–75. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-71-75.
18. Merson E.D., Poluyanov V.A., Myagkih P.N., Merson D.L., Vinogradov A.Yu. Vliyanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na put' rasprostraneniya treshchin kvaziskola v nizkouglerodistoi stali, okhrupchennoi vodorodom [Effect of the stress-strain state on the path of quasi-cleavage hydrogen-assisted cracking in low-carbon steel]. *Pis'ma o materialakh = Letters on materials*, 2021, vol. 11 (3), pp. 298–303. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-298-303.
19. Okhapkin K.A., Kudryavtsev A.S. Issledovanie vliyaniya dlitel'noi vysokotemperaturnoi ekspluatatsii na strukturu i svoystva austenitnoi khromonikel'molibdenovoi stali [Study of the influence of long-term high-tempera-



ture operation on the structure and properties of austenitic chromium-nickel-molybdenum steel]. *Pis'ma o materialakh* = *Letters on materials*, 2022, vol. 12 (1), pp. 21–26. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-1-21-26.

20. Okolovich G.A., Karpov S.V., Lareshcheva O.S. Novye tekhnologii v proizvodstve stal'nykh porshnevykh kolets [New technologies in the production of steel piston rings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2004, no. 2 (23), pp. 27–28.

21. Okolovich G.A., Guriev A.M., Shabalin V.N., Sizova A.E. Tekhnologiya naneseniya iznosostoikogo pokrytiya stal'nykh porshnevykh kolets [Technology for deposition of wear-resistant coating of piston rings]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4 (57), pp. 50–52.

22. Nekrasova T.V., Melnikov A.G. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 77–81. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

23. Strateichuk D.M., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Gladkikh V.A., Kukartsev V.V., Tynchenko Y.A., Karlina A.I. Morphological features of polycrystalline $CdS_{1-x}Se_x$ films obtained by screen-printing method. *Crystals*, 2023, vol. 13, p. 825. DOI: 10.3390/cryst13050825.

24. Vasiliev D.M., Smirnov B.I. Nekotorye rentgenograficheskie metody izucheniya plasticheski deformirovannykh metallov [Certain X-ray diffraction methods of investigating cold worked metals]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* = *Soviet Physics Uspekhi*, 1961, vol. 73 (3), pp. 503–558. (In Russian).

25. Bosikov I.I., Ereemeva S.V., Karlina A.I. Complex assessment of X-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice. *Crystals*, 2023, vol. 13, p. 528. DOI: 10.3390/cryst13030528.

26. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 912–916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

Conflicts of Interest

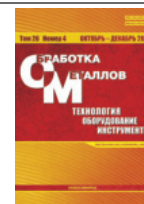
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства поверхностно модифицированных слоев после вневакуумной электронно-лучевой наплавки на сталь 12X18H9Т с применением порошковой смеси состава 10Cr-30В

Алина Дударева^{1, a, *}, Евдокия Бушуева^{1, b}, Андрей Тюрин^{1, c}, Евгений Домаров^{2, d},
Игорь Насенник^{1, 4, e}, Владислав Шикалов^{3, f}, Ксения Скороход^{3, g}, Александр Легкодимов^{2, 4, h}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 11, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институтская улица, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Федеральный исследовательский центр «Институт катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», пр. Никольский, 1, р.п. Кольцово, Новосибирская область, 1630559, Россия

^a <https://orcid.org/0009-0001-5649-7090>, dudareva-alina@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, bushueva@corp.nstu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-4757-424X>, a.tyurin@corp.nstu.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0003-0937-5004>, nasennik.2017@corp.nstu.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>, v.shikalov@gmail.com;

^g <https://orcid.org/0000-0003-0210-8405>, k.skorokhod@itam.nsc.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0001-7405-7454>, a_legkodimov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.374.2

История статьи:

Поступила: 06 сентября 2024

Рецензирование: 20 сентября 2024

Принята к печати: 08 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Хромоникелевая аустенитная сталь

Электронно-лучевая наплавка

Горячая пластическая деформация

Синхротронное излучение

Бор

Финансирование

Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России (проект FSUN-2023-0009).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время хромоникелевые аустенитные стали широко используются в нефтегазовой промышленности для бурения скважин благодаря высокой коррозионной стойкости, немагнитным свойствам, высокой ударной вязкости, пластичности и свариваемости. Однако для увеличения срока эксплуатации изделий необходимо повышение абразивной стойкости поверхностных слоев с сохранением химической стойкости, что является сложной технологической задачей. Решение такой задачи может заключаться в создании листовых заготовок «хромоникелевая аустенитная сталь – модифицированный слой», подвергнутых горячей пластической деформации. **Цель работы:** исследование влияния горячей пластической деформации на структуру и фазовый состав композиций «модифицированный слой – основной металл», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси бора и хрома на хромоникелевую аустенитную сталь 12X18H9Т. **В работе исследованы** образцы из стали 12X18H9Т с модифицированным слоем 10Cr-30В, сформированным вневакуумной электронно-лучевой наплавкой порошковой смеси хрома и бора и последующей горячей пластической деформацией при температуре 950 °С. **Методами исследования** являются механические испытания на микротвердость, рентгеноспектральный анализ модифицированного слоя, металлографические исследования, профильный анализ и расчет параметров решетки. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что после деформации получены бездефектные композиции, поверхностный слой которых представляет собой матричный композиционный материал, содержащий ориентированные частицы карбида хрома с измененными параметрами кристаллической решетки. После пластической деформации не было зафиксировано трещин и расслоений, что позволяет говорить о высоком качестве композиций «модифицированный слой – основной металл» с увеличенными показателями твердости, превышающими в 6,5 раза (13...11 ГПа) соответствующие показатели стали 12X18H9Т в состоянии поставки (2 ГПа). В модифицированном слое образуются сложные бориды типа $(Fe_xCr_y)B$, расположенные в γ -твердом растворе железа. Параметр решетки уменьшается для γ -железа с 3,588 до 3,580 Å, для бориды параметр a – с 5,126 до 5,111 Å, параметр c – с 4,228 до 4,199 Å.

Для цитирования: Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства поверхностно модифицированных слоев после вневакуумной электронно-лучевой наплавки на сталь 12X18H9Т с применением порошковой смеси состава 10Cr-30В / А.А. Дударева, Е.Г. Бушуева, А.Г. Тюрин, Е.В. Домаров, И.Е. Насенник, В.С. Шикалов, К.А. Скороход, А.А. Легкодимов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 192–205. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-192-205.

*Адрес для переписки

Дударева Алина Алексеевна, аспирант, м.н.с.

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +7 913 707-63-44, e-mail: dudareva-alina@mail.ru

Введение

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка позволяет получать композиции, которые состоят из основного металла и поверхностно-модифицированного упрочняющего слоя различной толщины, содержащего боридные частицы. Толщина слоя регулируется параметрами [1–12].

В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки необходимо использовать в качестве основного материала плоские заготовки толщиной не менее 9 мм с целью исключения коробления при наплавке порошковой смеси. Большая толщина и форма упрочняемой поверхности ограничивают возможности различных вариантов наплавки. Например, для бурения скважин в нефтегазовой отрасли применяются телеметрические системы контроля состояния и направления движения бурового инструмента, детали которых имеют сложную конструкцию с цилиндрическими и фасонными поверхностями. В качестве материала для этих деталей, эксплуатируемых в условиях коррозионных сред и абразивного воздействия частиц породы, используется хромоникелевая аустенитная сталь, обладающая немагнитными свойствами. Повышение гидроабразивной износостойкости поверхностных слоев таких изделий (внутренние поверхности корпусных деталей, труб и клапанов телеметрических систем) при сохранении химической стойкости и отсутствия намагничивания – важная техническая задача [13–15].

Использование горячей пластической деформации композиций, состоящих из относительно пластичной аустенитной стали и износостойко-

го модифицированного слоя, позволяет получать тонколистовые изделия и изделия с фасонными поверхностями, которые будут сочетать в себе высокие коррозионные и износостойкие свойства [16–20].

Цель настоящей работы: исследование влияния горячей пластической деформации на структуру и фазовый состав композиций «модифицированный слой – основной металл», полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси бора и хрома на хромоникелевую аустенитную сталь 12X18H9T.

Для поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- получить заготовки из аустенитной нержавеющей стали, упрочненной методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей 10Cr-30B;
- оценить влияние степени пластической деформации на структуру и свойства боридных слоев;
- исследовать влияние горячей пластической деформации на фазовый состав и параметры решетки модифицированного слоя.

Методика исследований

Для создания модифицированного слоя на стали 12X18H9T, упрочненного боридными частицами, применяли наплавку порошковой смеси (табл. 1) пучком релятивистских электронов, выведенным в воздушную атмосферу на ускорителе электронов промышленного типа ЭЛВ-6 в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Параметры вневакуумной электронно-лучевой наплавки представлены в табл. 2.

Таблица 1

Table 1

Состав порошковой смеси
Composition of the powder mixture

Наименование порошковой системы	Состав порошковой смеси, масс. %		
	Cr	B	MgF ₂ *
10Cr-30B	10	30	60
	Размеры частиц порошка, мкм		
	5...20	40...80	200...300

* Поскольку наплавка осуществляется без применения вакуума и защитных газов, то MgF₂ используется в качестве флюса.

Таблица 2

Table 2

Режимы вневакуумной электронно-лучевой обработки

Modes of non-vacuum electron beam surfacing

Параметр	Значение
Энергия электронного пучка, E	1,4 МэВ
Удельная энергия, $E_{уд}$	6,44 кДж/см ²
Масса порошка на единицу площади, m	0,33 г/см ²
Частота сканирования электронного пучка, ν	50 Гц
Расстояние от выпускного отверстия до заготовки, h	90 мм
Скорость перемещения столика с образцом, V	10 мм/с

Следует отметить, что аустенитная сталь применялась в качестве эталонного материала при дюраметрических исследованиях.

Образцы после вневакуумной электронно-лучевой наплавки подвергали горячей пластической деформации при 950 °С на прокатном стане «Кварто» с диаметром рабочих валков 330 мм, скоростью 60 мм/с и шагом деформации 5 %. Минимальная степень деформации составила 30 %, максимальная – 80 %. При деформации менее 30 % существенных изменений в структуре и внешнем виде заготовок не наблюдается. При 80 % наблюдается максимально возможная степень пластической деформации для образцов «модифицированный слой – основной металл».

Основываясь на научной литературе, температура для пластической деформации была выбрана 950 °С как минимальная температура для обеспечения пластичности подложки (12X18H9T) и относительной пластичности модифицированного слоя. Кроме того, деформация при 950 °С позволяет избежать перегрева материала и укрупнения зерна в основном металле.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Axio Observer Z1m Carl Zeiss.

Определение фазового состава и структуры выполнялось на станции «Жесткая рентгено-скопия» Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Дифракционный анализ проводили при комнатной температуре в просвечивающем режиме. Энергия излучения – 56,35 кэВ, размер пучка – 500×500 мкм, расстояние до исследуемого материала – 353 мм. Детектор Mar345 применялся для регистрации дифрагированного

излучения. После проведения исследования двумерные дифракционные картины интегрировались посредством программного обеспечения руFAI с открытым исходным кодом [21].

Профильный анализ дифракционных максимумов проводился с использованием функции псевдо-Войта и дальнейшим расчетом параметра кристаллической решетки матричным методом.

Для выявления особенностей расположения боридных частиц в структуре модифицированного слоя применяли растровый микроскоп Carl Zeiss EVO50 XVP. Исследования были проведены в режиме дифракции обратно рассеянных электронов, химический состав определялся с использованием энергодисперсионного анализатора EDX X-Act.

Микротвердость полученных модифицированных слоев измеряли по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450–76 при нагрузке 0,98 Н на микротвердомере Wolpert Group 402MVD. На каждый образец наносили не менее пяти дорожек с уколами по 10 отпечатков.

Результаты и их обсуждение

Наиболее эффективным для деформирования хромоникелевой стали является диапазон температур 950...1100 °С, в котором успевают пройти процессы динамического возврата и рекристаллизации, а также отсутствуют локальные области оплавления с дефектами, приводящими к разрушению.

На рис. 1 представлена структура поперечных шлифов модифицированных слоев, полученных

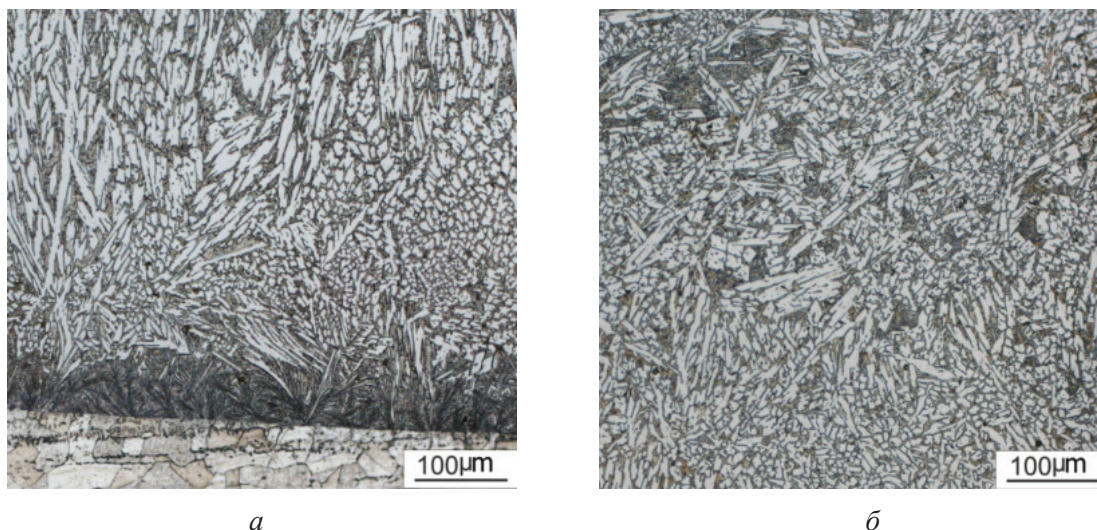


Рис. 1. Структура образцов до пластической деформации:
a – поперечный шлиф; *б* – фронтальный шлиф

Fig. 1. Structure of the specimens before plastic deformation:
a – transverse section; *б* – frontal section

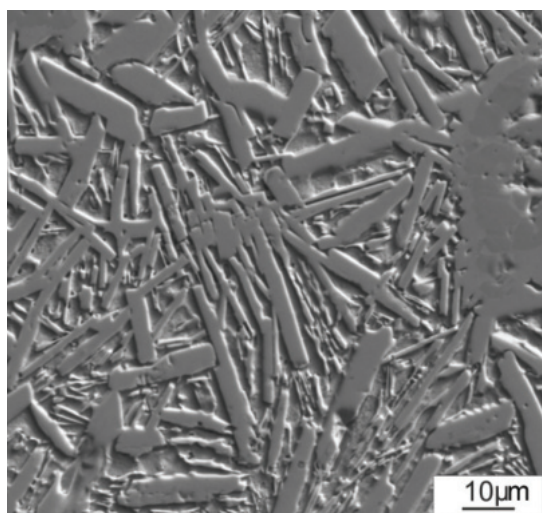
после наплавки порошковой смеси состава 10Cr-30В и представляющих собой композиционный материал с плотным расположением боридных частиц. Под матричным композиционным материалом понимается образец «модифицированный слой – основной металл» (рис. 1, *a*). Бориды выступают в качестве упрочняющей фазы в модифицированном слое. Плотность расположения боридных частиц оценивалась визуально (рис. 1, *б*). Модифицированный поверхностный слой толщиной до 2,5 мм связан с основным материалом переходной зоной толщиной 100...150 мкм. В структуре модифицированного слоя присутствуют бориды, не имеющие правильной геометрической формы, что может быть объяснено столкновением кристаллов в процессе их роста. Переходный слой представляет собой эвтектику, компонентами которой являются аустенит и кристаллы боридов.

Согласно экспериментальным данным, при увеличении степени пластической деформации композиций наблюдается формирование трещин и расслоений в относительно крупных боридных частицах, что может способствовать их выкрашиванию и образованию дефектов в виде несплошностей, хотя до деформации дефектов в структуре не наблюдается (рис. 2). При увеличении степени пластической деформации происходит измельчение боридных частиц с их выстраиванием в направлении прокатки (рис. 2, *a*, *в*, *д*). Ха-

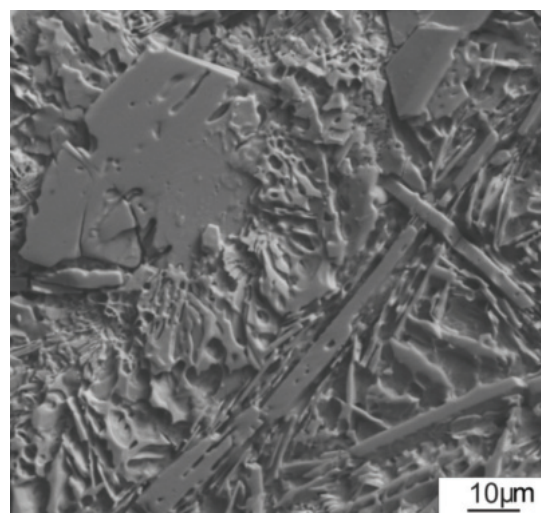
отическое расположение боридных частиц после вневакуумной электронно-лучевой наплавки (рис. 2, *a*) и текстура прокатки с ориентацией боридов (рис. 2, *в*, *д*) подтверждают предположение, высказанное выше. Под воздействием высоких температур (950 °С) и больших деформаций (80 %) измельченные бориды, не контактирующие с матричным материалом, становятся источниками дефектов структуры в виде сетки трещин и выкрашивания при приготовлении шлифов (рис. 2, *б*, *г*, *е*).

Кроме того, после горячей пластической деформации с увеличением степени деформации бориды неправильной геометрической формы (рис. 2, *б*) становятся более сглаженными за счет высоких температур и частичной диффузии элементов (рис. 2, *д*, *е*).

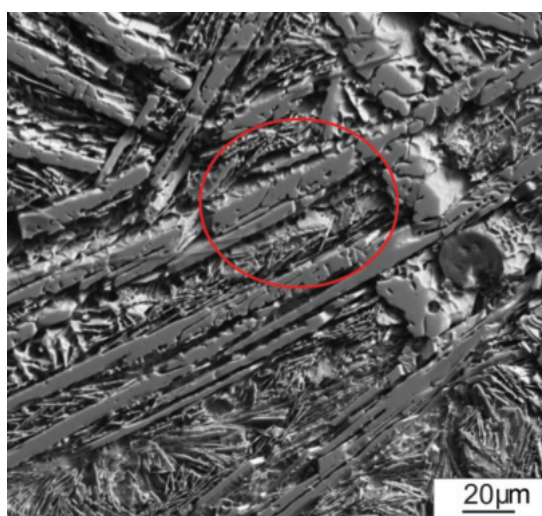
В соответствии с данными растровой электронной микроскопии (рис. 3, *a*, *б*) поверхность образца после максимальной пластической деформации характеризуется четко выраженными следами пластического течения и разрушением высокопрочных частиц боридов (рис. 3, *в*). Наблюдается также продольное уширение образцов (рис. 3, *г*) и текстура основного металла 12Х18Н9Т (рис. 3, *a*), которая является результатом высокой пластичности стали и подтверждается в дальнейшем рентгенофазовым анализом. Анализ изображений при максимальной пластической деформации показывает присутствие



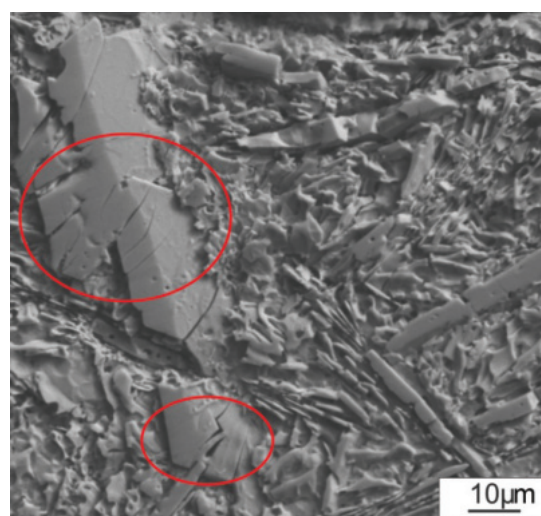
a



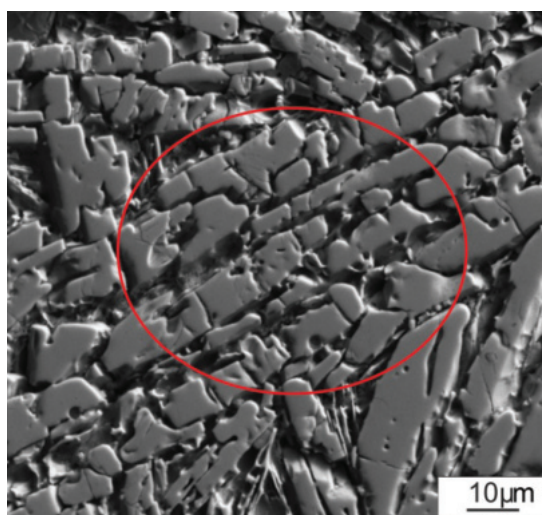
б



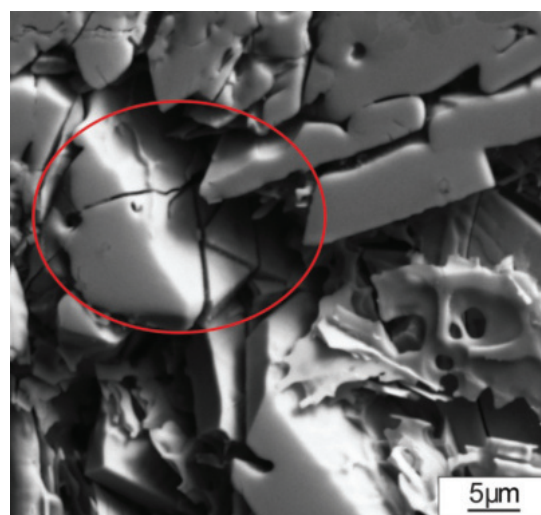
в



г



д



е

Рис. 2. Изменение формы боридных частиц в зависимости от степени пластической деформации: *a, б* – до пластической деформации; *в, г* – 30 %; *д, е* – 80 %. Красным овалом выделены места трещин, расслоений и несплошностей в боридных частицах

Fig. 2. Change in the shape of boride particles depending on the degree of plastic deformation: *a, б* – before plastic deformation; *в, г* – 30 %; *д, е* – 80 %. The places of cracks, delamination and discontinuities in boride particles are highlighted in a red oval

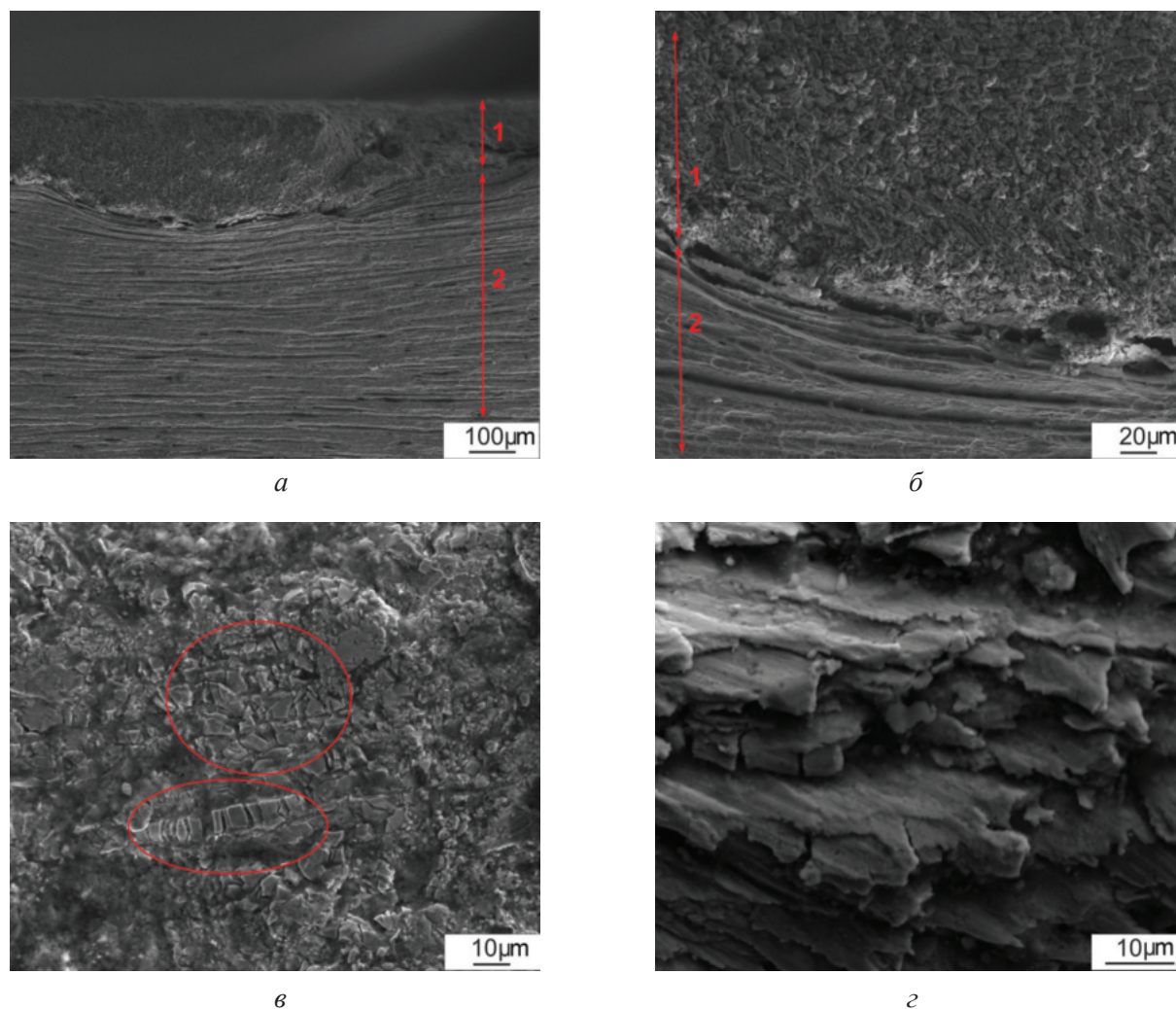


Рис. 3. Структура композиции после 80 % деформации и травления смесью кислот HNO_3 и HCl в соотношении 1:3 по объему, где 1 – модифицированный слой, 2 – основной металл: а, б – поперечный шлиф композиции после прокатки; в – структура модифицированного слоя с выделенными разрушенными боридами после пластической деформации; г – морфология боковой поверхности основного материала 12X18H9T вдоль прокатки

Fig. 3. The structure of the composition after 80 % deformation after etching with a mixture of HNO_3 and HCl acids in a ratio of 1:3 by volume, where 1 is the modified layer, 2 is the base metal:

а, б – the transverse section of the composition after rolling; в – the structure of the modified layer, with isolated destroyed borides after plastic deformation; г – morphology of the side surface of the base material 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti along the rolling direction

небольших трещин между модифицированным слоем и основным металлом в переходной зоне (рис. 2, б).

При более детальном рассмотрении переходной зоны (рис. 3, б) наблюдается текстура деформации, видны множественные бороздки и ямки травления. В модифицированном слое заметно частичное растрескивание высокопрочных частиц одновременно с их измельчением (рис. 3, в). Можно предположить, что такая структура образуется вследствие критических напряжений и сопутствующих им деформаций.

Толщина модифицированного слоя уменьшается от 2,5 мм (рис. 1, а) до 0,5 мм (рис. 3, а). Композиция в процессе деформации приобретает сложную слоистую морфологию и уменьшается по толщине в 7–8 раз (рис. 3, а).

Анализ результатов исследования показал, что пластическая деформация композиции начинается с основного материала, а затем продолжается в модифицированном слое. С увеличением степени обжатия бориды измельчаются по хрупкому механизму, а основной металл и матрица модифицированного слоя – преимущественно по

вязкому. Механизм разрушения высокопрочных частиц боридов и матрицы одинаков при всех степенях деформации. Начиная с 30 % деформации изменяется степень измельчения боридных частиц и продолжается их частичное разрушение с увеличением последующей прокатки.

Кроме того, при рассмотрении боридных частиц в матрице аустенита с использованием рентгеноспектрального анализа модифицированного слоя были зафиксированы высокие доли хрома в бориде, а также железа с никелем в матрице, что, предположительно, свидетельствует о диффузии бора из боридов в материал матрицы (рис. 4).

Для оценки механических свойств проводили измерение микротвердости образцов. Средняя микротвердость модифицированного слоя для образцов без деформации составляет 13 ГПа, 12 ГПа – для деформации 30 %, 11 ГПа – для деформации 80 %. Микротвердость хромоникелевой аустенитной стали 12Х18Н9Т составляет

2,3 ГПа. Можно заметить, что чем больше степень деформирования композиции, тем меньше значения микротвердости, это объясняется измельчением высокопрочных частиц и образованием сетки мелких трещин между ними при захватке в этих местах матричного материала.

Фазовый состав образцов определялся с использованием жесткого рентгеновского излучения с длиной волны 1,783 Å. На рентгенограммах наблюдаются только дифракционные пики фаз аустенита и сложных боридов (Fe_xCr_y)В (рис. 5). Анализ рентгенограмм позволяет ориентировочно проанализировать дефектность структуры по уширению рентгеновских линий. Пики уширяются с увеличением степени пластической деформации. При этом следует отметить уменьшение интенсивности пиков боридов относительно интенсивности пиков аустенита и текстурованность их распределения в аустенитной матрице, а также рост интенсивности дифракционных пиков 200 и 202 при степени дефор-

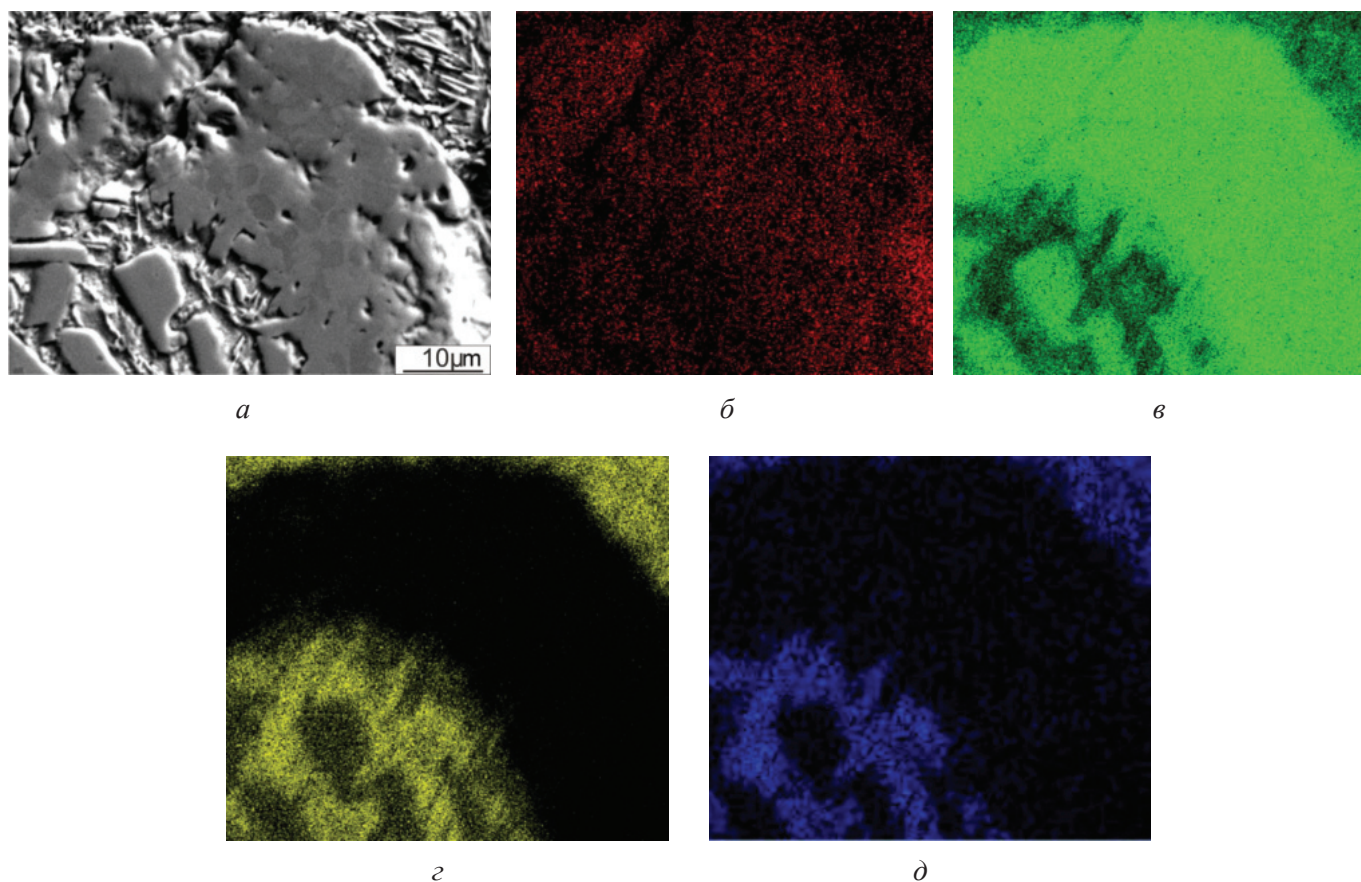


Рис. 4. Микрорентгеноспектральный анализ образцов при степени деформации 80 %:

a – поверхность съемки; *б* – распределение В; *в* – распределение Cr; *г* – распределение Fe; *д* – распределение Ni

Fig. 4. Micro X-ray spectral analysis of specimens after 80 % deformation:

a – shooting surface; *б* – B distribution; *в* – Cr distribution; *г* – Fe distribution; *д* – Ni distribution

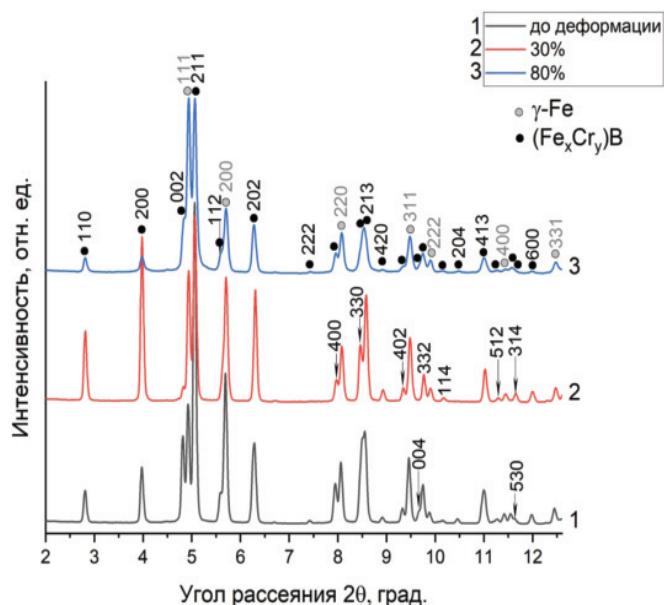


Рис. 5. Образцы после дифракции синхротронного излучения

Fig. 5. Specimens after synchrotron radiation diffraction

мации 30 %. В процессе после вневакуумной электронно-лучевой наплавки и последующей пластической деформации присутствует текстура, это означает, что образцы для синхротронных исследований были вырезаны и снимались с накоплением в разных токах, и в каком-то месте могла быть более выраженная текстура.

Для боридов наиболее развитыми плоскостями являются плоскости (110), (200), (002), (211) и (202).

Оценка ширины спектральной линии на половине высоты ее максимума (FWHM), или полуширина, позволяет только ориентировочно оценить дефектность структуры упрочняющей фазы модифицированного слоя из-за наличия множества факторов, влияющих на точность рассчитываемых параметров (возможная диффузия бора из упрочняющей фазы при горячей пластической деформации и появление текстуры).

В табл. 3 отражено изменение FWHM боридов и матрицы материала. Уширение интерференционных линий может быть связано с неоднородностью изменения межплоскостного расстояния за счет изменения химического состава фаз.

При степени пластической деформации 80 % значения FWHM максимальны как для матрицы, так и для боридов. FWHM минимальна для образцов до деформации при расчете матрицы и при 30 % – при расчете боридов. Можно предположить, что при степени деформации 30 % изменение полуширины пиков для боридов менее интенсивно, чем для аустенита. Это можно объяснить тем, что у аустенита пластичность матрицы выше, чем у боридов.

Таблица 3

Table 3

Изменение FWHM дифрактограмм модифицированных слоев после пластической деформации
Change in FWHM diffraction patterns of modified layers after plastic deformation

Угловая позиция 2θ, град.	FWHM при степени пластической деформации		
	0 %	30 %	80 %
Для аустенита			
4,94	0,068	0,070	0,076
5,71	0,073	0,079	0,091
8,08	0,075	0,077	0,092
9,48	0,077	0,080	0,089
9,90	0,076	0,084	0,081
Для боридов			
2,81	0,069	0,069	0,077
3,98	0,07	0,068	0,088
4,82	0,07	0,065	0,079
5,06	0,07	0,076	0,085
5,59	0,07	0,062	0,083
6,28	0,088	0,101	0,084

После пластической деформации характерно уменьшение параметров элементарной ячейки. Для аустенита характерна кубическая сингония с пространственной группой $Fm-3m$ (225), для борида – тетрагональная с $I4/mcm$ (140). Уменьшение параметров элементарной ячейки

аустенита может быть объяснено тем, что происходит замещение иона большего радиуса на ион с меньшим радиусом. Одновременно с этим изменяется объем элементарной ячейки борида, что, в свою очередь, указывает на увеличение содержания в нем атомов металла (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Изменение параметра решетки после горячей пластической деформации
Change in lattice parameter after hot plastic deformation

Параметр решетки	Параметр решетки при степени пластической деформации, Å		
	0 %	30 %	80 %
Для аустенита			
<i>a</i>	3,588	3,580	3,580
Для боридов			
<i>a</i>	5,126	5,113	5,111
<i>c</i>	4,228	4,238	4,199

Выводы

Результаты исследования влияния горячей пластической деформации на структуру и свойства композиции «модифицированный слой 10Cr-30В – хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н9Т», полученной методом вневакуумной электронно-лучевой обработки (ВЭЛО), позволяют сделать ниже изложенные выводы.

1. Были получены образцы «модифицированный слой – основной металл» с применением технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых композиций на поверхность стали 12Х18Н9Т с последующей горячей пластической деформацией (ГПД) при температуре 950 °С. Модифицированный слой составлял 2,5 мм после ВЭЛО и примерно 0,5 мм после процесса ГПД до 80 %.

2. Структура модифицированного поверхностного слоя после горячей пластической деформации представляет собой композиционный материал с дисперсными частицами упрочняющей фазы в виде боридов $(Fe_xCr_y)B$. Переходный слой между этим материалом и основным металлом не имеет трещин и пор. Бориды в процессе пластической деформации измельчаются и ориентируются в сторону прокатки. По результатам дюрOMETрических исследований установлено, что микротвердость модифицированных слоев

после деформации в 6,5...5,5 раза (13...11 ГПа) выше микротвердости основного материала 12Х18Н9Т (2 ГПа), который выступал в качестве материала эталона. Для исключения выкрашивания частиц упрочняющей фазы модифицированного слоя необходимо повысить содержание в нем матричного материала за счет увеличения содержания в наплавляемой порошковой смеси хрома и уменьшения содержания бора.

3. Синхротронные методы исследования показали, что в модифицированном слое образуются сложные бориды типа $(Fe_xCr_y)B$, расположенные в γ -твердом растворе железа. С увеличением степени пластической деформации происходит уширение дифракционных максимумов и увеличение объема элементарных ячеек аустенита и боридов за счет накопления дефектов в кристаллической решетке.

Список литературы

1. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.Y. Teplykh, 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.
2. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, D.S. Krivizhenko,



A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

3. Wear-resistant boride reinforced steel coatings produced by non-vacuum electron beam cladding / D.A. Santana, G.Y. Koga, W. Wolf, I.A. Bataev, A.A. Ruktuev, C. Bolfarini, C.S. Kiminami, W.J. Botta, A.M. Jorge Jr // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 386. – P. 125466. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125466.

4. Challenges in optimizing the resistance to corrosion and wear of amorphous Fe-Cr-Nb-B alloy containing crystalline phases / G.Y. Koga, T. Ferreira, Y. Guo, D.D. Coimbra, A.M. Jorge Jr, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, W.J. Botta // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2021. – Vol. 555. – P. 120537. – DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120537.

5. Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении / Е.А. Батаева, И.А. Батаев, В.Г. Буров, Л.И. Тушинский, М.Г. Голковский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2009. – № 3 (645). – С. 3–5.

6. Structure and tribological properties of steel after non-vacuum electron beam cladding of Ti, Mo and graphite powders / I.A. Bataev, D.O. Mul, A.A. Bataev, O.G. Lenivtseva, M.G. Golkovski, Ya.S. Lizunkova, R.A. Dostovalov // *Materials Characterization*. – 2016. – Vol. 112. – P. 60–67. – DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.028.

7. Tribo-oxidation of Ti-Al-Fe and Ti-Al-Mn cladding layers obtained by non-vacuum electron beam treatment / O.E. Matts, S.Yu. Tarasov, B. Domenichini, D.V. Lazurenko, A.V. Filippov, V.A. Bataev, M.V. Rashkovets, I.K. Chakin, K.I. Emurlaev // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 421. – P. 127442. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127442.

8. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere / A.A. Ruktuev, D.V. Lazurenko, T.S. Ogneva, R.I. Kuzmin, M.G. Golkovski, I.A. Bataev // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 448. – P. 128921. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.

9. Ogneva T., Ruktuev A., Girsh A. Non-vacuum electron beam cladding of Ti-Ni-Al intermetallics on titanium // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 11. – P. 191–196. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.130.

10. Structure and tribological properties of “carbon steel – VC containing coating” compositions formed by non-vacuum electron-beam surfacing of vanadium-containing powder mixtures / D.O. Mul, E.G. Bushueva, D.V. Lazurenko, E.A. Lozhkina, E.V. Domarov // *Sur-*

face and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 474. – P. 130107. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130107.

11. Structural characterization of layers fabricated by non-vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of niobium and boron / T.A. Zimogliadova, A.A. Bataev, D.V. Lazurenko, I.A. Bataev, V.A. Bataev, M.G. Golkovskii, S. Holger, T.S. Ogneva, A.A. Ruktuev // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 33. – P. 104363. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104363.

12. Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy coatings produced by non-vacuum electron beam cladding: Understanding the effect of Al by in-situ synchrotron X-ray diffraction / T.S. Ogneva, K.I. Emurlaev, K.E. Kuper, Y.N. Malyutina, E.V. Domarov, I.K. Chakin, K.A. Skorokhod, A.A. Ruktuev, I.E. Nasennik, I.A. Bataev // *Applied Surface Science*. – 2024. – Vol. 665. – P. 160367. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160367.

13. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding / A. Teplykh, M. Golkovskiy, A. Bataev, E. Drobyaz, S.V. Veselov, E. Golovin, I.A. Bataev, A. Nikulina // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 287–290. – P. 26–31. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.26.

14. Формирование упрочняющих покрытий наплавкой в пучке релятивистских электронов / И.М. Полетика, М.Г. Голковский, М.Д. Борисов, Р.А. Салимов, М.В. Перовская // *Физическая мезомеханика*. – 2005. – Т. 8, спец. вып. – С. 129–132.

15. Структура и свойства покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой / И.М. Полетика, Ю.Ф. Иванов, М.Г. Голковский, М.В. Перовская // *Физика и химия обработки материалов*. – 2007. – № 6. – С. 48–56.

16. Guo C., Kelly P.M. Boron solubility in Fe–Cr–B cast irons // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 352. – P. 40–45. – DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00449-5.

17. Yuan L.L., Han J.T., Liu J. Analysis of boride phase composition in high boron alloyed stainless steel containing titanium // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 941–944. – P. 226–231. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.941-944.226.

18. Ван Хуэй, Ван Тао. Влияние горячей прокатки и обработки на твердый раствор на микроструктуру и механические свойства дуплексной нержавеющей стали 0Cr21Ni5Ti-2B с высоким содержанием бора // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2021. – № 3 (789). – С. 13–18.

19. Влияние прокатки и термической обработки на структуру и свойства слоев, сформированных на титановых заготовках методом электронно-лучевой наплавки / В.В. Самойленко, Д.В. Лазуренко, И.А. По-

ляков, А.А. Руктуев, О.Г. Ленивцева, В.С. Ложкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 2 (67). – С. 55–63. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63.

20. Structure and mechanical properties of a two-layered material produced by the E-beam surfacing of Ta and Nb on the titanium base after multiple rolling / V.A. Bataev, M.G. Golkovski, V.V. Samoylenko,

A.A. Ruktuev, I.A. Polyakov, N.K. Kuksanov // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 437. – P. 181–189. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.114.

21. The fast azimuthal integration Python library: pyFAI / G. Ashiotis, A. Deschildre, Z. Nawaz, J.P. Wright, D. Karkoulis, F.E. Picca, J. Kieffer // Journal of Applied Crystallography. – 2015. – Vol. 48 (2). – P. 510–519. – DOI: 10.1107/S1600576715004306.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 -

Metal Working and Material Science

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



The effect of hot plastic deformation on the structure and properties of surface-modified layers after non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of composition 10Cr-30B on steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti

Alina Dudareva^{1, a, *}, Evdokia Bushueva^{1, b}, Andrey Tyurin^{1, c}, Evgeny Domarov^{2, d},
 Igor Nasennik^{1, 4, e}, Vladislav Shikalov^{3, f}, Ksenia Skorokhod^{3, g}, Alexander Legkodymov^{2, 4, h}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 11 Acad. Lavrentieva Pr., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁴ "Federal Research Center" G.K. Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Center for Collective Use "Siberian Ring Photo Source", 1 Nikolsky ave., Koltsovo village, Novosibirsk region, 1630559, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0001-5649-7090>, dudareva-alina@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, bushueva@corp.nstu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-4757-424X>, a.tyurin@corp.nstu.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0003-0937-5004>, nasennik.2017@corp.nstu.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>, v.shikalov@gmail.com;

^g <https://orcid.org/0000-0003-0210-8405>, k.skorokhod@itam.nsc.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0001-7405-7454>, a_legkodymov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 September 2024

Revised: 20 September 2024

Accepted: 08 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Austenitic Ni-Cr steel
 Electron beam surfacing
 Hot plastic deformation
 Synchrotron radiation
 Boron

Funding

The study was carried out in accordance with the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FSUN-2023-0009).

ABSTRACT

Introduction. Currently, austenitic Ni-Cr steels are widely used in the oil and gas industry for drilling wells due to its high corrosion resistance, non-magnetic properties, high impact strength, ductility and weldability. However, in order to increase the service life of products, it is necessary to increase the abrasive resistance of the surface layers while maintaining chemical resistance, which is a difficult technological task. The solution to such a problem can be the creation of sheet blanks "austenitic Ni-Cr steel - modified layer" subjected to hot plastic deformation. **The purpose of the work** is to study the effect of hot plastic deformation on the structure and phase composition of "modified layer – base metal" compositions obtained by the method of non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of boron and chromium on austenitic Ni-Cr steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti. **Material and methods of research.** The work investigated specimens made of steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti with a modified 10Cr-30B layer formed by non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of chromium and boron, and subsequent hot plastic deformation at a temperature of 950 °C. The research methods are mechanical tests for microhardness, X-ray spectral analysis of the modified layer, metallographic studies, profile analysis, calculation of lattice parameters. **Results and discussion.** It is revealed that after deformation, defect-free compositions are obtained, the surface layer of which is a matrix composite material containing oriented chromium carbide particles with altered crystal lattice parameters. After plastic deformation, cracks and delamination are not recorded, which allows us to speak about the high quality of the "modified layer – base metal" compositions with increased hardness values exceeding 6.5 times as-delivered steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti (3...11 GPa and 2 GPa, respectively). In the modified layer, complex borides of type $(Fe_xCr_y)B$ are formed and located in a γ -solid solution of iron. The lattice parameter decreases for γ -iron from 3.588 Å to 3.580 Å, for boride parameter a from 5.126 Å to 5.111 Å, parameter c from 4.228 Å to 4.199 Å.

For citation: Dudareva A.A., Bushueva E.G., Tyurin A.G., Domarov E.V., Nasennik I.E., Shikalov V.S., Skorokhod K.A., Legkodymov A.A. The effect of hot plastic deformation on the structure and properties of surface-modified layers after non-vacuum electron beam surfacing of a powder mixture of composition 10Cr-30B on steel 0.12 C-18 Cr-9 Ni-Ti. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 192–205. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-192-205. (In Russian).

* Corresponding author

Dudareva Alina A., Ph.D. (Engineering) student, Research assistant
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 913 707-63-44, **e-mail:** dudareva-alina@mail.ru

References

1. 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.
2. 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, pp. 472–481. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
3. Santana D.A., Koga G.Y., Wolf W., Bataev I.A., Ruktuev A.A., Bolfarini C., Kiminami C.S., Botta W.J., Jorge Jr A.M. Wear-resistant boride reinforced steel coatings produced by non-vacuum electron beam cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 386, p. 125466. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125466.
4. Koga G.Y., Ferreira T., Guo Y., Coimbra D.D., Jorge Jr A.M., Kiminami C.S., Bolfarini C., Botta W.J. Challenges in optimizing the resistance to corrosion and wear of amorphous Fe-Cr-Nb-B alloy containing crystalline phases. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 555, p. 120537. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120537.
5. Bataeva E.A., Bataev I.A., Burov V.G., Tushinskii L.I., Golkovskii M.G. Vliyaniye iskhodnogo sostoyaniya na neodnorodnost' struktury uglerodistykh stalei, uprochnennykh metodom elektronno-luchevoi obrabotki pri atmosfernom davlenii [The effect of initial state on the structure inhomogeneity of carbon steels strengthened by electron-beam treatment at atmospheric pressure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2009, no. 3 (645), pp. 3–5. (In Russian).
6. Bataev I.A., Mul D.O., Bataev A.A., Lenivtseva O.G., Golkovski M.G., Lizunkova Ya.S., Dostovalov R.A. Structure and tribological properties of steel after non-vacuum electron beam cladding of Ti, Mo and graphite powders. *Materials Characterization*, 2016, vol. 112, pp. 60–67. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.028.
7. Matts O.E., Tarasov S.Yu., Domenichini B., Lazurenko D.V., Filippov A.V., Bataev V.A., Rashkovets M.V., Chakin I.K., Emurlaev K.I. Tribo-oxidation of Ti-Al-Fe and Ti-Al-Mn cladding layers obtained by non-vacuum electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 421, p. 127442. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127442.
8. Ruktuev A.A., Lazurenko D.V., Ogneva T.S., Kuzmin R.I., Golkovski M.G., Bataev I.A. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 448, p. 128921. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.
9. Ogneva T., Ruktuev A., Girsh A. Non-vacuum electron beam cladding of Ti-Ni-Al intermetallics on titanium. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11, pp. 191–196. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.130.
10. Mul D.O., Bushueva E.G., Lazurenko D.V., Lozhkina E.A., Domarov E.V. Structure and tribological properties of “carbon steel – VC containing coating” compositions formed by non-vacuum electron-beam surfacing of vanadium-containing powder mixtures. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 474, p. 130107. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130107.
11. Zimogliadova T.A., Bataev A.A., Lazurenko D.V., Bataev I.A., Bataev V.A., Golkovskii M.G., Holger S., Ogneva T.S., Ruktuev A.A. Structural characterization of layers fabricated by non-vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of niobium and boron. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 33, p. 104363. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104363.
12. Ogneva T.S., Emurlaev K.I., Kuper K.E., Malyutina Yu.N., Domarov E.V., Chakin I.K., Skorokhod K.A., Ruktuev A.A., Nasennik I.E., Bataev I.A. Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy coatings produced by non-vacuum electron beam cladding: Understanding the effect of Al by in-situ synchrotron X-ray diffraction. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 665, p. 160367. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160367.
13. Teplykh A., Golkovskiy M., Bataev A., Drobyaz E., Veselov S.V., Golovin E., Bataev I.A., Nikulina A. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 287–290, pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.26.
14. Poletika I.M., Golkovskii M.G., Borisov M.D., Salimov R.A., Perovskaya M.V. Formirovaniye uprochnyayushchikh pokrytii naplavkoi v puchke relyativistskikh elektronov [Fusion of hardening coatings in a relativistic electron beam]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2005, vol. 8, special. iss., pp. 129–132. (In Russian).
15. Poletika I.M., Ivanov Yu.F., Golkovskii M.G., Perovskaya M.V. Struktura i svoistva pokrytii, poluchennykh elektronno-luchevoi naplavkoi [Structure and properties of the coatings produced by electron-beam overlaying welding]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2007, no. 6, pp. 48–56. (In Russian).
16. Guo C., Kelly P.M. Boron solubility in Fe–Cr–B cast irons. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 352, pp. 40–45. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00449-5.

17. Yuan L.L., Han J.T., Liu J. Analysis of boride phase composition in high boron alloyed stainless steel containing titanium. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 941–944, pp. 226–231. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.941-944.226.

18. Wang H., Wang T. Vliyanie goryachei prokatki i obrabotki na tverdyi rastvor na mikrostrukturu i mekhanicheskie svoystva dupleksnoi nerzhavayushchei stali 0Cr21Ni5Ti-2B s vysokim soderzhaniem bora [Influence of hot rolling and solution treatment on the microstructure and mechanical properties of high boron duplex stainless steel 0Cr21Ni5Ti-2B]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2021, no. 3 (789), pp. 13–18. (In Russian).

19. Samoilenko V.V., Lazurenko D.V., Polyakov I.A., Ruktuev A.A., Lenivtseva O.G., Lozhkin V.S. Vliyanie prokatki i termicheskoi obrabotki na strukturu i svoystva sloev, sformirovannykh na titanovykh zagotovkakh metodom elektronno-luchevoi naplavki [Influence of rolling and heat treatment on the structure and properties of the coatings fabricated on the titanium substrates by electron beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 2 (67), pp. 55–63. DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-55-63.

20. Bataev V.A., Golkovski M.G., Samoylenko V.V., Ruktuev A.A., Polyakov I.A., Kuksanov N.K. Structure and mechanical properties of a two-layered material produced by the E-beam surfacing of Ta and Nb on the titanium base after multiple rolling. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 437, pp. 181–189. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.114.

21. Ashiotis G., Deschildre A., Nawaz Z., Wright J.P., Karkoulis D., Picca F.E., Kieffer J. The fast azimuthal integration Python library: pyFAI. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, vol. 48 (2), pp. 510–519. DOI: 10.1107/S1600576715004306.

Conflicts of Interest

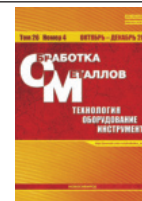
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча

Александр Болтрушевич^{1, а}, Никита Мартюшев^{1, б, *}, Виктор Козлов^{1, в}, Юлия Кузнецова^{2, д}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Российская Федерация

² Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация

^а <https://orcid.org/0000-0001-9971-7850>, aeb20@tpu.ru; ^б <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martjushev@tpu.ru;

^в <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>, kozlov-viktor@bk.ru; ^д <https://orcid.org/0000-0002-1388-6125>, julx@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669

История статьи:

Поступила: 13 сентября 2024

Рецензирование: 05 октября 2024

Принята к печати: 10 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

Инконель 625

Электродуговая наплавка

Электронно-лучевая наплавка

Микроструктура

Финансирование

Данное исследование было поддержано программой развития ТПУ.

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие обрабатывающей промышленности привело к появлению новых методов изготовления заготовок и деталей. Одним из таких новых перспективных методов является аддитивное производство, в частности технологии электродуговой и электронно-лучевой наплавки проволокой. Применение этих технологий при производстве заготовок из жаропрочных материалов дает ряд существенных преимуществ. В работе представлены результаты исследования микроструктуры образцов из инконеля марки 625. Образцы были изготовлены путем 3D-наплавки электронным лучом в вакууме и электродуговой наплавки в среде защитных газов. **Цель работы:** сравнительный анализ микроструктуры заготовок из никелевого сплава инконель 625, полученных с помощью технологий EBAM и WAAM. **Методы и материалы.** Используемые в работе образцы изготавливались на оборудовании, разработанном в Томском политехническом университете. Проводились металлографические исследования и растровая электронная микроскопия, была определена микротвердость полученных образцов. **Результаты и обсуждение.** Сравнение образцов, полученных по двум различным технологиям аддитивной печати – EBAM и WAAM, показало общие закономерности формирования структуры, появляющиеся при использовании аддитивных технологий. У образцов наблюдалась дендритная микроструктура, в образцах присутствовали зоны, богатые Ti, Mo и Nb, что характерно для неравновесного охлаждения. В образцах также наблюдались поры. Зерна в образцах имели преимущественно вытянутую форму и ориентировались в направлении теплоотвода. Длина зерен достигала значений 1 мм. Различия в образцах наблюдались в количестве образующихся включений интерметаллидов, в количестве образовавшихся пор и в размере зерен. Технология EBAM дает более однородную структуру. Различие в твердости между EBAM и WAAM составляет около 3,5 %. При этом скорость изготовления образцов по технологии WAAM существенно выше.

Для цитирования: Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча / А.Е. Болтрушевич, Н.В. Мартюшев, В.Н. Козлов, Ю.С. Кузнецова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 206–217. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217.

Введение

В последние годы аддитивное производство стремительно расширяет сферу применения благодаря своим уникальным преимуществам. Этот метод производства позволяет создавать детали сложной формы с высокой точностью, используя различные материалы, от пластика до металла, и при этом значительно сокращая время и затраты по сравнению с традиционными техно-

*Адрес для переписки

Мартюшев Никита Владимирович, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30,
634050, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (3822) 60-62-85, e-mail: martjushev@tpu.ru

логиями [1–4]. В зависимости от требований к конечному продукту специалисты применяют разные технологии аддитивного производства. Активное развитие аддитивных технологий (АТ) приводит к удешевлению продукции, производимой с их помощью. Это позволяет быстро изготавливать детали и заготовки не только сложной, но более простой формы из дорогостоящих материалов [5, 6]. Примером таких деталей могут быть фланцы из жаростойких материалов. При использовании АТ нет необходимости изготавливать отверстие и также сокращается объем материала, снимаемого за счет субтрактивной обработки. Это делает применение АТ в данном случае экономически обоснованным. АТ также позволяет изготавливать фланцы под конкретный типоразмер, что дает еще большую экономию времени и затрат в сравнении с изготовлением аналогичной детали из проката [7–9].

Для быстрого производства деталей простой формы типа фланцев из жаропрочных материалов, в частности инконелей, наиболее подходят технологии электронно-лучевой (ЕВАМ) и электродуговой печати (ВААМ) [10].

ЕВАМ использует мощный электронный луч для расплавления металлического проволочного материала, который наплавляется слой за слоем, образуя требуемую деталь. Этот метод позволяет создавать детали больших размеров с высокой плотностью и прочностью [11–14]. Одно из ключевых преимуществ аддитивного производства заключается в его способности создавать сложные 3D-компоненты с большей скоростью и гибкостью по сравнению с традиционными методами, такими как фрезерование или литье [15, 16]. 3D-печать позволяет сократить количество этапов производства, минимизировать отходы материала и создавать детали, которые невозможно изготовить другими способами. Это открывает новые возможности для инженеров, позволяя им воплощать в жизнь самые смелые идеи [17–20].

Наплавка заготовок в вакууме по технологии ЕВАМ дает возможность существенно ускорить процесс изготовления заготовки в сравнении с технологией SLS (селективное лазерное спекание). Однако это достаточно дорогостоящий и трудоемкий метод изготовления деталей [21, 22]. Большого удешевления и упрощения технологии изготовления заготовки можно добиться, используя ВААМ-технология. Эта технология

использует дуговую сварку для наплавления металлической проволоки слой за слоем, образуя трехмерные объекты. ВААМ позволяет создавать крупногабаритные детали значительно быстрее, чем другие аддитивные технологии, такие как электронно-лучевая наплавка. ВААМ подходит для производства деталей из различных металлов, включая сталь, титан и никелевые сплавы [23–25]. Недостатками данной технологии являются возможность образования пористости из-за печати в газовой среде и худшее качество печатаемой поверхности.

Особенности работы ЕВАМ и ВААМ будут отражаться на структуре и свойствах получаемых заготовок. Технология ЕВАМ и в настоящее время применяется довольно редко для печати жаропрочных сплавов [26, 27]. Это обусловлено достаточно низкой распространенностью и новизной данной технологии. Печать жаропрочных сплавов с помощью ВААМ-технологии тоже применяется нечасто, так как имеет ряд технологических сложностей. По этим причинам работ, посвященных печати технологиями ЕВАМ и ВААМ жаропрочных никелевых сплавов, крайне мало [28–31].

Цель данной работы: сравнительный анализ микроструктуры заготовок из никелевого сплава инконель 625, полученных с помощью технологий ЕВАМ и ВААМ.

Методы и материалы

В качестве материала для изготовления образцов был выбран распространенный никелевый сплав марки инконель 625. Образцы печатались проволокой диаметром 1,2 мм. Печать осуществлялась на подложке размерами 110×110×20 мм, изготовленной из нержавеющей стали. Подложка помещалась над опорной пластиной и плотно прижималась зажимами. Основная подложка используется для нанесения расплавленного сырья на деталь. Она выполняет функцию защиты от проникновения расплава в подложку и повреждения стола.

В используемой для печати установке имеется возможность регулировки положения механизма подачи проволоки. Регулировка положения осуществляется относительно электронного луча и печатаемой заготовки. Это позволяет обеспечить стабильность передачи материала.

В процессе сварки между плавким предохранителем и расплавленной ванной создается перемычка из расплавленного металла [32, 33].

Химический состав материала проволоки, используемой для электронно-лучевой печати, приведен в табл. 1.

Печать первой группы образцов осуществлялась на электронно-лучевой установке наплавки проволокой, изготовленной в Томском политехническом университете. Печать второй группы образцов – на установке электродуговой наплавки проволокой, также изготовленной в Томском политехническом университете.

В ходе экспериментальных работ были напечатаны образцы четырех типов. Изготовлены вертикально и горизонтально ориентированные образцы по каждой из исследуемых технологий – EBAM и WAAM.

Для исследования микроструктуры были сделаны поперечные сечения образцов. Травление микроструктуры осуществляли с помощью смеси концентрированных азотной кислоты HNO_3 (67 масс. %) и соляной кислоты HCl (33 масс. %), взятых в соотношении 1:3 по объему. Микроструктурные исследования проводили с помощью металлографического микроскопа MMP-1 производства БИОМЕД. Фотографии микроструктуры получены с применением видеоокуляра DCM-510 SCOPE. Микротвердость измеряли посредством автоматического комплекса на базе микротвердомера EMCO-TEST DuraScan-10. Измерения выполняли на тех же образцах, на которых проводили металлографические исследования. Измерения проводили индентором Виккерса при нагрузке 1 кгс с выдержкой 10 с.

Таблица 1

Table 1

Химический состав проволоки из никелевого сплава марки инконель 625

Chemical composition of Inconel 625 nickel alloy wire

Химический элемент	Ta	Al	Nb	Mo	Cr	Si	Fe	Co	Ti	Mn	Ni
%	0,3	0,38	2,8	7,5	22,5	0,8	1,3	0,2	0,35	0,1	63,68

Результаты и их обсуждение

В первую очередь были получены четыре образца для проведения исследований – по два образца с помощью каждой из технологий, EBAM и WAAM. Были изготовлены образцы вертикальной ориентации (рис. 1, а, в) и горизонтальной ориентации (рис. 1, б, г). Из приведенных фотографий видно, что точность и качество поверхности образцов, полученных с помощью электронно-лучевой наплавки, выше. В этом случае меньше разбрызгивания металла, чем при изготовлении с помощью электродуговой наплавки. Скорость остывания образцов, полученных с помощью EBAM, ниже, чем при WAAM-печати. При EBAM теплоотвод затруднен из-за отсутствия атмосферы. При WAAM-наплавке инконеля используется гелий. Кроме того, видно, что в EBAM-образце большее количество слоев. При WAAM-наплавке толщина печатаемого слоя больше и скорость печати выше, но

это сопровождается существенными колебаниями температуры. Обусловленные температурными колебаниями напряжения вызывают деформацию подложки даже при ее толщине около 5 мм. Вертикальная ориентация образцов дает большую скорость, но при этом возникают большие напряжения. При горизонтальной ориентации образец остывает более равномерно. Это выражается в меньшей деформации подложки.

Микроструктура образцов из инконеля 625, полученных с помощью технологий EBAM и WAAM, представлена на рис. 2, а–г. На этом рисунке показаны микрофотографии, сделанные с помощью оптического микроскопа в центре образца. Наблюдается удлиненная ячеистая структура с яркими частицами в междендритных областях, а также четко видно наличие дендритной структуры во всех образцах. Для горизонтальных образцов при обеих технологиях дендриты имеют длинные оси первого порядка, при этом оси второго порядка практически отсутствуют.

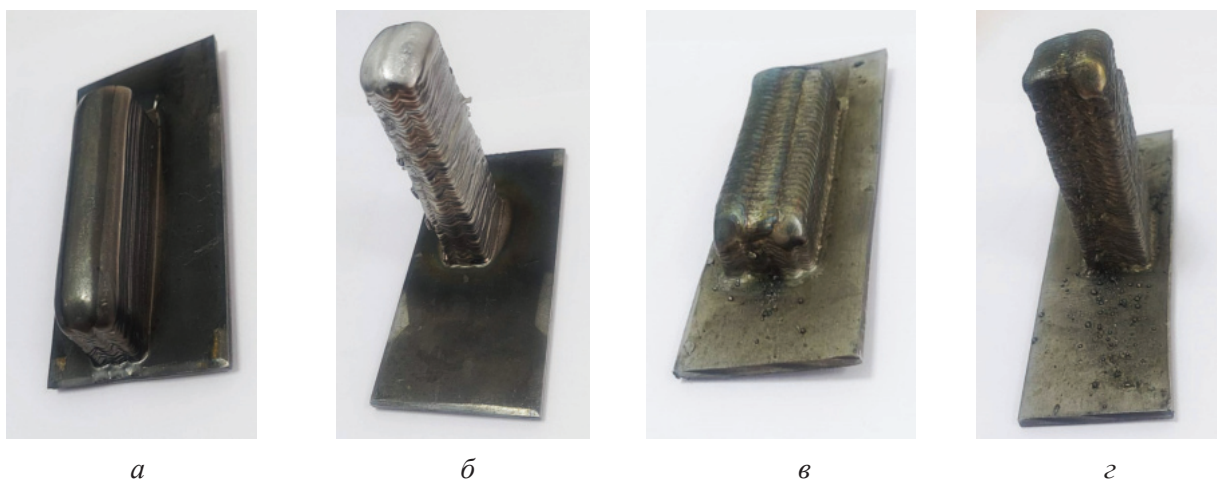


Рис. 1. Фотографии образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:
a – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – вертикальный образец, полученный EBAM-технологией; *в* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией; *г* – вертикальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 1. Photos of specimens obtained using various additive technologies:
a – horizontal specimen obtained using EBAM technology; *б* – vertical specimen obtained using EBAM technology; *в* – horizontal specimen obtained using WAAM technology; *г* – vertical specimen obtained using WAAM technology

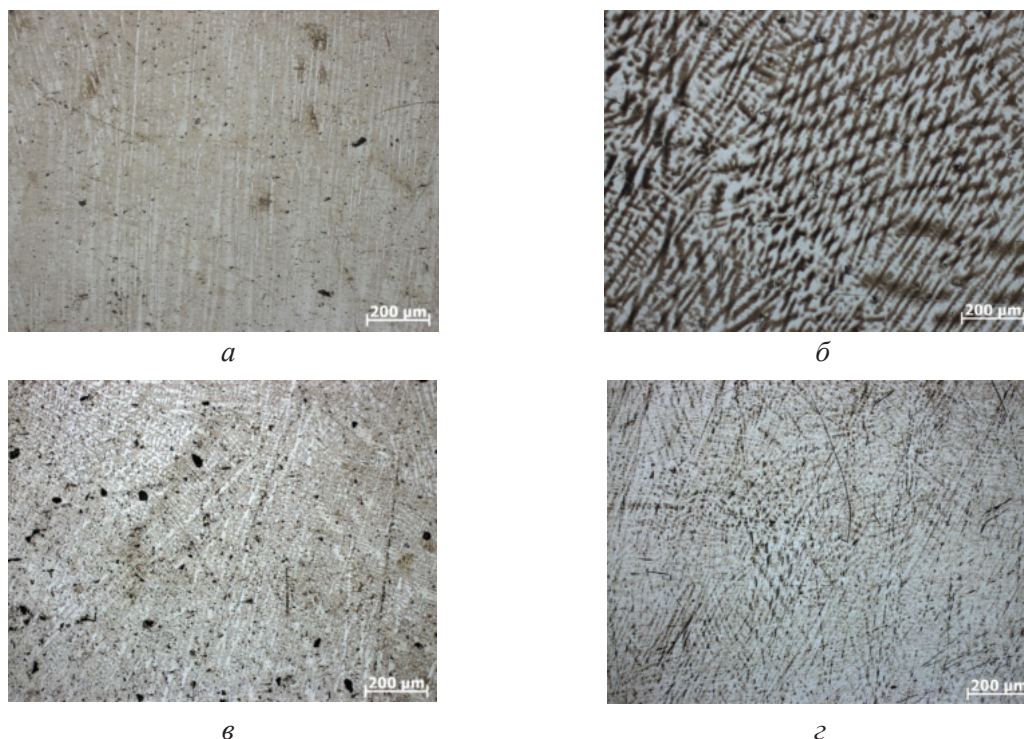


Рис. 2. Микроструктура образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:

a – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – вертикальный образец, полученный EBAM-технологией; *в* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией; *г* – вертикальный образец, полученный WAAM-технологией

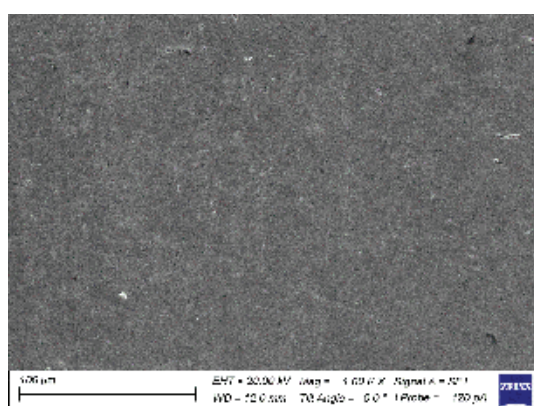
Fig. 2. Microstructure of specimens obtained using various additive technologies:
a – horizontal specimen obtained using EBAM technology; *б* – vertical specimen obtained using EBAM technology; *в* – horizontal specimen obtained using WAAM technology; *г* – vertical specimen obtained using WAAM technology

Для вертикальных образцов скорость охлаждения меньше, и успевают сформироваться оси второго порядка, а в некоторых местах можно увидеть зародыши осей третьего порядка. Отличие в развитии дендритов хорошо заметно для EBAM-технологии (рис. 2, *а* и *б*). Кроме того, из показанной микроструктуры видно, что зерна имеют текстуру. Текстура более развита для вертикальных образцов из-за большей скорости охлаждения.

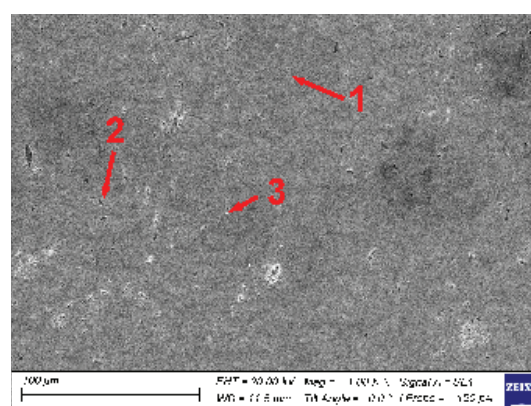
Безусловно, разная скорость охлаждения приводит к образованию различных размеров зерен в образцах. Однако в целом для всех исследуемых технологий наблюдается одна и та же тенденция: зерна имеют дендритное строение, зерна вытянуты в направлении теплоотвода. Причем длина зерен увеличивается при удалении от подложки. Для вертикальных образцов скорость охлаждения ниже и длина зерен в полученных образцах может достигать 0,8...0,9 мм (вертикальные EBAM-образцы). Для горизонтальных образцов длина зерен достигает 0,3...0,5 мм. Эти данные согласуются с результатами других исследователей. В работе [6] образец из инконеля 625, изготовленный с использованием техники SLM, имел длину зерна около 1 мм. Образцы из инконеля 718, полученные с использованием процесса прямого лазерного аддитивного сплавления в работе [32], имели длину 3 мм. Авторы работ [11, 16] показали, что равноосные зерна в

основном располагаются в нижней части, рядом с подложкой инконеля 625. При удалении от подложки зерна вытягиваются, появляется текстура и длина зерен значительно увеличивается. Наши результаты хорошо согласуются с данными этих авторов. Закономерности формирования структуры образцов при печати с помощью технологий EBAM и WAAM аналогичны технологии SLM. Отличие наблюдается в основном в размерах фазовых составляющих.

Фотографии поверхности напечатанных образцов из инконеля 625, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлены на рис. 3. Как и в других исследованиях [2, 4, 5, 7], в осажденном материале часто наблюдались мелкие микронные частицы. Учитывая размер частиц фазовых составляющих, их количественный химический анализ может быть затруднен из-за сигнала XRD, исходящего от матричного материала. Химический состав изготовленного материала (табл. 2) во многом подобен составу проволоки, используемой для наплавки, за исключением таких элементов, как железо и алюминий, содержание которых было ниже. Частицы, отмеченные на рис. 3 как 3, показали больше Nb, Mo, Ti и C (табл. 2). Это указывает на присутствие карбидов MC. Аналогичная ситуация также наблюдалась в сплаве инконель 625, изготовленном методом аддитивного производства, у авторов работ [2, 4, 7]. Фаза, отме-



а



б

Рис. 3. Результаты СЭМ образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:

а – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 3. SEM of specimens obtained using various additive technologies:

а – horizontal specimen obtained using EBAM technology; *б* – horizontal specimen obtained using WAAM technology

Таблица 2

Table 2

Химический состав изготовленного материала
Chemical composition of the manufactured material

Исследуемая область с рис. 3, %	Ni	Cr	Nb	Mo	Si	Fe	Al	Ti	C
1	64,0	22,3	1,1	4,2	0,7	1,3	0,1	0,1	6,2
2	2,7	3,5	7,2	0,5	–	0,7	–	48,1	37,3
3	38,5	21,6	16,7	8,9	4,1	0,7	0,2	0,2	9,1

ченная как точка 2, имела повышенное количество Ni, Nb, Cr и Mo без присутствия углерода (табл. 2). Это показывает присутствие интерметаллических фаз.

Микротвердость заготовок определяли методом Виккерса (при нагрузке 1 кгс с выдержкой 10 с) как среднее значение двадцати отпечатков в разных местах (рис. 4).

Анализ показателей микротвердости (табл. 3) показывает, что твердость вертикальных образцов ниже, чем горизонтальных. Для образцов, изготовленных по технологиям EBAM и WAAM, это расхождение составляет около 3,5 %. Из полученных данных также видно, что дисперсия значений твердости для вертикально ориентированных образцов значительно выше, чем для

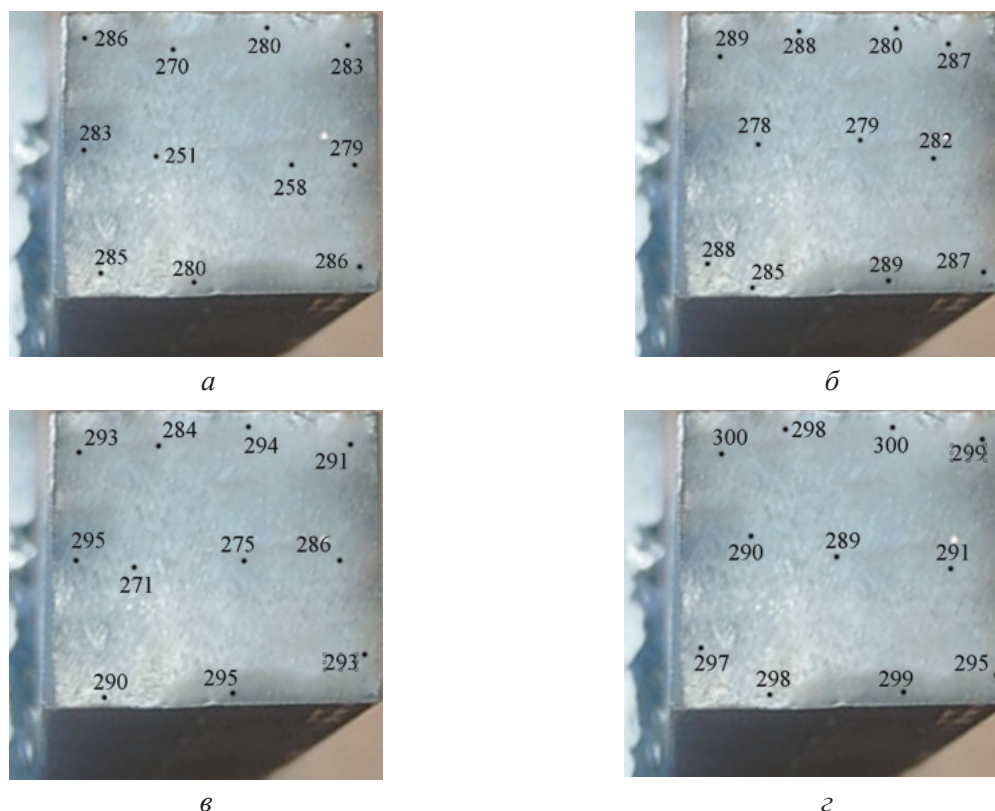


Рис. 4. Микротвердость образцов, полученных с помощью различных аддитивных технологий:

a – горизонтальный образец, полученный EBAM-технологией; *б* – вертикальный образец, полученный EBAM-технологией; *в* – горизонтальный образец, полученный WAAM-технологией; *г* – вертикальный образец, полученный WAAM-технологией

Fig. 4. Microhardness of specimens obtained using various additive technologies:
a – horizontal specimen obtained using EBAM technology; *б* – vertical specimen obtained using EBAM technology; *в* – horizontal specimen obtained using WAAM technology; *г* – vertical specimen obtained using WAAM technology

Таблица 3

Table 3

Микротвердость образцов
Microhardness of specimens

Технология изготовления образца	Ориентация образца	Максимальная твердость, HV	Минимальная твердость, HV	Средняя твердость, HV
WAAM	Горизонтально	251	286	273,0
WAAM	Вертикально	278	289	284,2
EBAM	Горизонтально	271	295	283,4
EBAM	Вертикально	289	300	294,4

горизонтально ориентированных. Это можно объяснить меньшим градиентом температур в процессе печати. Для горизонтальных образцов теплоотвод идет более интенсивно, что приводит к образованию более значительных температурных градиентов и формированию менее однородной структуры. Это согласуется с данными анализа микроструктуры образцов. В вертикально ориентированных образцах формируется более однородная структура, в них меньше пор, а также меньше включений интерметаллидов в сравнении с горизонтально ориентированными образцами.

Полученные данные также показывают, что твердость образцов, изготовленных по технологии EBAM, выше, чем у образцов, изготовленных по технологии WAAM. Это тоже хорошо согласуется с результатами анализа микроструктуры. Технология EBAM из-за печати в вакууме дает более плавный процесс охлаждения образцов, что приводит к образованию более однородной структуры, обладающей большей твердостью.

Выводы

Сравнение образцов, изготовленных двумя различными технологиями аддитивной печати – EBAM и WAAM, было проведено с учетом различий в получаемой микроструктуре и их твердости. Печать с использованием обеих технологий привела к образованию дендритной микроструктуры образцов. Во всех образцах присутствовали зоны, богатые Ti, Mo и Nb. В образцах также наблюдались поры. Зерна в образцах имели преимущественно вытянутую форму и ориентировались в направлении теплоотвода. Длина зерен достигала значений в 1 мм. Пере-

численные особенности наблюдались для всех полученных образцов независимо от технологии изготовления или ориентации образца при печати.

Различия в образцах наблюдались в количестве образующихся включений интерметаллидов и в размере зерен. Так, технология EBAM дает более однородную структуру. В результате этого твердость образцов, полученных по технологии EBAM, выше, чем твердость образцов, полученных по технологии WAAM, при аналогичной их ориентации при печати. Различие в твердости между EBAM и WAAM составляет около 3,5 %. При этом скорость изготовления образцов по WAAM-технологии существенно выше.

Список литературы

1. Alvarez L.F., Garcia C., Lopez V. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels // ISIJ International. – 1994. – Vol. 34 (6). – P. 516–521. – DOI: 10.2355/isijinternational.34.516.
2. Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment / C. Li, R. White, X. Fang, M. Weaver, Y. Guo // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 705. – P. 20–31.
3. Liverani E., Fortunato A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117 (3–4). – P. 809–821. – DOI: 10.1007/s00170-021-07639-6.
4. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting / S. Li, Q. Wei, Y. Shi, Z. Zhu, D. Zhang // Journal of Materials Science & Technology. – 2015. – Vol. 31. – P. 946–952.
5. Formation of the Ni_3Nb δ -phase in stress-relieved Inconel 625 produced via laser powder-bed fusion additive manufacturing / E.A. Lass, M.R. Stoudt, M.E. Wil-



liams, M.B. Katz, L.E. Levine, T.Q. Phan, T.H. Gnaeupel-Herold, D.S. Ng // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. – 2017. – Vol. 48. – P. 5547–5558. – DOI: 10.1007/s11661-017-4304-6.

6. Characterization and comparison of Inconel 625 processed by selective laser melting and laser metal deposition / G. Marchese, X.G. Colera, F. Calignano, M. Lorusso, S. Biamino, P. Minetola, D. Manfredi // *Advanced Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 19. – P. 1–9. – DOI: 10.1002/adem.201600635.

7. Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition / F. Xu, Y. Lv, B. Xu, Y. Liu, F. Shu, P. He // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 45. – P. 446–455.

8. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review // *Journal of Machine Engineering*. – 2018. – Vol. 18 (4). – P. 5–24. – DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

9. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / E. Zverev, V. Skeebe, N.V. Martyushev, P. Skeebe // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 736. – P. 132–137. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

10. Dang J., Zhang H., Ming W. New observations on wear characteristics of solid $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46 (5). – P. 5876–5886. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.

11. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 / I. Jurić, I. Garašić, M. Bušić, Z. Kožuh // *JOM*. – 2018. – Vol. 71. – P. 703–708. – DOI: 10.1007/s11837-018-3151-2.

12. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V. Ivancivsky, V. Skeebe, I. Bataev, D.V. Lobanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 156. – P. 012025. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

13. Keist J.S., Palmer T.A. Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 693. – P. 214–224. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.102.

14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2024. – № 3. – С. 170–181. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

15. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy / F. Montevecchi, N. Grossi, H. Takagi, A. Scippa, H. Sasahara, G. Campatelli // *Procedia*

CIRP. – 2016. – Vol. 46. – P. 476–479. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.034.

16. Microstructure and fracture behavior of TiC particles reinforced Inconel 625 composites prepared by laser additive manufacturing / M.Y. Shen, X.J. Tian, N. Liu, H.B. Tang, X. Cheng // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 734. – P. 188–195. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.280.

17. Gong Y., Li P. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 33. – P. 2387–2395. – DOI: 10.1007/s12206-019-0237-x.

18. Ni Ch., Zhu L., Yang Zh. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view // *Wear*. – 2019. – Vol. 436. – P. 203006. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.

19. Xiong X., Haiou Z., Guilan W. A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling // *Rapid Prototyping Journal*. – 2008. – Vol. 14 (1). – P. 53–56. – DOI: 10.1108/13552540810841562.

20. Nekrasova T.V., Melnikov A.G. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ with improved operational properties of the working surface // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 77–81. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

21. Martyushev N., Petrenko Yu. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 174–178. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.

22. Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива / В.В. Зотов, В.У. Мнацаканян, М.М. Базлин, В.С. Лакшинский, Е.В. Дятлова // *Горная промышленность*. – 2024. – № 2. – С. 143–146. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-143-146.

23. Усанова О.Ю., Столяров В.В., Рязанцева А.В. Исследование свойств ионно-имплантированного титанового сплава с памятью формы, используемого в конструкциях горнодобывающего оборудования // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 695–701. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.

24. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. The determination of yield strength from hardness measurements // *Metallurgical Transactions*. – 1971. – Vol. 2 (7). – P. 1979–1983. – DOI: 10.1007/bf02913433.

25. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Y. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.

26. Lou X., Andresen P.L., Rebak R.B. Oxide inclusions in laser additive manufactured stainless steel and their effects on impact toughness and stress corrosion cracking behavior // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 499. – P. 182–190. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.036.
27. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing / X. Chen, J. Li, X. Cheng, H. Wang, Z. Huang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 715. – P. 307–314. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.002.
28. Яценко В.А., Крюков Я.В. Фрагментация и консолидация производственных цепочек в мировой редкоземельной промышленности // *Горная промышленность*. – 2022. – № 1. – С. 66–74. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-66-74.
29. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 66 (1). – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012014.
30. Хайдоров А.Д., Юнусов Ф.А. Вакуумная термическая обработка высоколегированных коррозионноустойчивых сталей // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 226–235.
31. Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process / Y. Tian, D. McAllister, H. Colijn, M. Mills, D.F. Farson, M. Nordin, S.S. Babu // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. – 2014. – Vol. 45. – P. 4470–4483. – DOI: 10.1007/s11661-014-2370-6.
32. Кречетов А.А. Обеспечение качества сварных соединений армокаркаса анкерной крепи путем роботизации производства // *Горная промышленность*. – 2021. – № 3. – С. 130–134. – DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-130-134.
33. The resource efficiency assessment technique for the foundry production / I.G. Vidayev, N.V. Martyushev, A.S. Ivashutenko, A.M. Bogdan // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 141–145. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 -

Metal Working and Material Science

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



Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing

Aleksandr Boltrushevich^{1, a}, Nikita Martyshev^{1, b, *}, Victor Kozlov^{1, c}, Yulia Kuznetsova^{2, d}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9971-7850>,  aeb20@tpu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>,  kozlov-viktor@bk.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-1388-6125>,  julx@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2024

Revised: 05 October 2024

Accepted: 10 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Additive manufacturing

Inconel 625

Electric arc surfacing

Electron beam surfacing

Microstructure

Funding

This research was supported by TPU development program.

Acknowledgements

The research was carried out at the equipment of the Engineering Center “Design and Production of High-Tech Equipment” and the shared research facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. Development of the manufacturing industry has led to the emergence of new methods for manufacturing blanks and parts. One of these new promising methods is additive manufacturing and, in particular, electric arc and electron beam surfacing technologies. The use of these technologies in the production of blanks from heat-resistant materials provides a number of significant advantages. The paper presents the results of a study of the microstructure of *Inconel 625* specimens obtained using *EBAM* and *WAAM* technologies. **The purpose of the work** is a comparative analysis of the microstructure of *Inconel 625* nickel alloy blanks obtained using *EBAM* and *WAAM* technologies. **Methods and materials.** The paper examined specimens obtained using *EBAM* and *WAAM* technologies. The specimens were manufactured using equipment developed at Tomsk Polytechnic University. Metallographic studies, scanning electron microscopy were carried out, and the microhardness of the obtained specimens was determined. **Results and discussion.** Comparison of specimens obtained by two different additive printing technologies *EBAM* and *WAAM* showed general patterns of structure formation that appear when using additive technologies. The specimens have a dendritic microstructure and contain zones rich in *Ti*, *Mo* and *Nb*, which is typical for nonequilibrium cooling. Pores are also observed in the specimens. The grains in the specimens have a predominantly elongated shape and are oriented in the direction of heat removal. The length of the grains reaches 1 mm. Differences in the specimens are observed in the number of formed inclusions of intermetallic compounds, in the number of formed pores, in the size of the grains. The *EBAM* technology provides more uniform structure. The difference in hardness between *EBAM* and *WAAM* is about 3.5 %. At the same time, the speed of specimen production using the *WAAM* technology is significantly higher.

For citation: Boltrushevich A.E., Martyshev N.V., Kozlov V.N., Kuznetsova Yu.S. Structure of Inconel 625 alloy blanks obtained by electric arc surfacing and electron beam surfacing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217. (In Russian).

References

1. Alvarez L.F., Garcia C., Lopez V. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels. *ISIJ International*, 1994, vol. 34 (6), pp. 516–521. DOI: 10.2355/isijinternational.34.516.
2. Li C., White R., Fang X., Weaver M., Guo Y. Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 705, pp. 20–31.

* Corresponding author

Martyshev Nikita V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin Avenue,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 3822 60-62-85, e-mail: martjushev@tpu.ru

3. Liverani E., Fortunato A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117 (3–4), pp. 809–821. – DOI: 10.1007/s00170-021-07639-6.
4. Li S., Wei Q., Shi Y., Zhu Z., Zhang D. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, vol. 31, pp. 946–952.
5. Lass E.A., Stoudt M.R., Williams M.E., Katz M.B., Levine L.E., Phan T.Q., Gnaeupel-Herold T.H., Ng D.S. Formation of the Ni_3Nb δ -phase in stress-relieved Inconel 625 produced via laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2017, vol. 48, pp. 5547–5558. DOI: 10.1007/s11661-017-4304-6.
6. Marchese G., Colera X.G., Calignano F., Lorusso M., Biamino S., Minetola P., Manfredi D. Characterization and comparison of Inconel 625 processed by selective laser melting and laser metal deposition. *Advanced Engineering Materials*, 2016, vol. 19, pp. 1–9. DOI: 10.1002/adem.201600635.
7. Xu F., Lv Y., Xu B., Liu Y., Shu F., He P. Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition. *Materials & Design*, 2013, vol. 45, pp. 446–455.
8. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review. *Journal of Machine Engineering*, 2018, vol. 18 (4), pp. 5–24. DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.
9. Zverev E., Skeebe V., Martyushev N.V., Skeebe P. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 132–137. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.
10. Dang J., Zhang H., Ming W. New observations on wear characteristics of solid $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V. *Ceramics International*, 2020, vol. 46 (5), pp. 5876–5886. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.
11. Jurić I., Garašić I., Bušić M., Kožuh Z. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625. *JOM*, 2018, vol. 71, pp. 703–708. DOI: 10.1007/s11837-018-3151-2.
12. Ivancivsky V., Skeebe V., Bataev I., Lobanov D.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, p. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.
13. Keist J.S., Palmer T.A. Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 693, pp. 214–224. DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.102.
14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.
15. Montecocchi F., Grossi N., Takagi H., Scippa A., Sasahara H., Campatelli G. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 476–479. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.034.
16. Shen M.Y., Tian X.J., Liu N., Tang H.B., Cheng X. Microstructure and fracture behavior of TiC particles reinforced Inconel 625 composites prepared by laser additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 734, pp. 188–195. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.280.
17. Gong Y., Li P. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, pp. 2387–2395. DOI: 10.1007/s12206-019-0237-x.
18. Ni Ch., Zhu L., Yang Zh. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view. *Wear*, 2019, vol. 436, p. 203006. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.
19. Xiong X., Haiou Z., Guilan W. A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, vol. 14 (1), pp. 53–56. DOI: 10.1108/13552540810841562.
20. Nekrasova T.V., Melnikov A.G. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ with improved operational properties of the working surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 77–81. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.
21. Martyushev N., Petrenko Yu. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 174–178. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.
22. Zotov V.V., Mnatsakanyan V.U., Bazlin M.M., Lakshinsky V.S., Dyatlova E.V. Povyshenie resursa rabochikh koles tsentrobezhnykh nasosov shakhtnogo vodootliva [Extending the service life of centrifugal dewatering pump impellers in mines]. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2024, no. 2, pp. 143–146. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-143-146.



23. Usanova O.Yu., Stolyarov V.V., Ryazantseva A.V. Issledovanie svoystv ionno-implantirovannogo titanovogo splava s pamyat'yu formy, ispol'zuemogo v konstruktivnykh gornodobyvayushchego oborudovaniya [Investigation of the properties of ion-implanted shape memory titanium alloy used in the construction of mining equipment]. *Ustoichivoe razvitiye gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 695–701. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.
24. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. The determination of yield strength from hardness measurements. *Metallurgical Transactions*, 1971, vol. 2 (7), pp. 1979–1983. DOI: 10.1007/bf02913433.
25. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.
26. Lou X., Andresen P.L., Rebak R.B. Oxide inclusions in laser additive manufactured stainless steel and their effects on impact toughness and stress corrosion cracking behavior. *Journal of Nuclear Materials.*, 2018, vol. 499, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.036.
27. Chen X., Li J., Cheng X., Wang H., Huang Z. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 715, pp. 307–314. DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.002.
28. Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. Fragmentatsiya i konsolidatsiya proizvodstvennykh tsepochek v mirovoi redkozemel'noi promyshlennosti [Fragmentation and consolidation of production chain in the global rare earth industry]. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2022, no. 1, pp. 66–74. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-66-74.
29. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66 (1), p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/66/1/012014.
30. Haidorov A.D., Yunusov F.A. Vakuumnaya termicheskaya obrabotka vysokolegirovannykh korrozionostoikikh stalei [Vacuum heat treatment of high alloy corrosion-resistant steels]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU = St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 2017, vol. 23 (1), pp. 226–235. DOI: 10.18721/JEST.230123.
31. Tian Y., McAllister D., Colijn H., Mills M., Farson D.F., Nordin M., Babu S.S. Rationalization of microstructure heterogeneity in INCONEL 718 builds made by the direct laser additive manufacturing process. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2014, vol. 45, pp. 4470–4483. DOI: 10.1007/s11661-014-2370-6.
32. Krechetov A.A. Obespechenie kachestva svarnykh soedinenii armokarkasa ankernoi krepki putem robotizatsii proizvodstva [Securing the quality of mesh weld joints in bolt support through robotized operation]. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2021, no. 3, pp. 130–134. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-130-134.
33. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 141–145. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141.

Conflicts of Interest

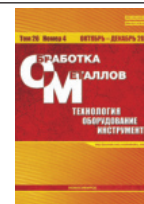
The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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)

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



Исследование гидрофильности поверхности металлических материалов, модифицированных ультрафиолетовым лазерным излучением

Татьяна Саблина^{a, *}, Марина Панченко^b, Илья Зятиков^c, Алексей Пучикин^d,
Иван Коновалов^e, Юрий Панченко^f

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/3, г. Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-5941-5732>, sabltat@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-0236-2227>, panchenko.marina4@gmail.com;
^c <https://orcid.org/0000-0003-3219-9299>, zyatikov@igl.hcei.tsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-6931-9800>, puchikin@igl.hcei.tsc.ru;
^e <https://orcid.org/0000-0002-1166-1416>, ivan@igl.hcei.tsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-8017-7268>, yu.n.panchenko@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 544.032.65

История статьи:

Поступила: 24 сентября 2024
Рецензирование: 05 октября 2024
Принята к печати: 14 октября 2024
Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Ультрафиолетовое лазерное излучение
Поверхность
Лазерная обработка
Гидрофильность
Никелид титана
Нержавеющая сталь
Краевой угол смачивания

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348).

АННОТАЦИЯ

Введение. Поверхностная модификация с использованием лазерного излучения является перспективным направлением в области создания новых технологий обработки металлических материалов, в том числе медицинского назначения. Способность лазеров изменять поверхностные характеристики материала и, следовательно, его взаимодействие с окружающей средой вызвала большой интерес среди исследователей. Несмотря на многочисленные рекомендации по использованию лазерной обработки поверхности, до сих пор не хватает систематических и детальных исследований по изучению влияния параметров, в особенности ультрафиолетового лазерного воздействия, на структурно-фазовое состояние и свойства модифицированной поверхности. **Целью** настоящей работы является исследование гидрофильности поверхности никелида титана и стали после УФ-лазерной обработки. **Методы исследования.** Экспериментальные образцы из сплава на основе никелида титана TiNi (TiH-10) и нержавеющей стали 12X18H9T подвергали локальному (диаметр пучка 0,5 см) воздействию твердотельного Nd:YAG-лазера на длине волны 266 нм с длительностью импульса ~5 нс и частотой повторения импульса 10 Гц. Воздействие на материал осуществляли при постоянной плотности энергии излучения, равной 0,1 Дж/см², с изменением продолжительности воздействия от 10 до 600 с. До и после УФ-лазерной обработки определяли смачиваемость поверхности материалов и свободную поверхностную энергию. Структуру, элементный и фазовый состав, а также топографию поверхности никелида титана и стали исследовали с помощью растровой электронной микроскопии с определением элементного состава методом энергодисперсионной спектроскопии, рентгенофазового анализа и профилометрии. **Результаты и обсуждение.** Ультрафиолетовая лазерная обработка поверхности образцов никелида титана и стали приводит к повышению их гидрофильности. В исходном состоянии краевой угол смачивания составляет ~75° для обоих материалов, а после ультрафиолетовой лазерной обработки он снижается до 11...13° для TiNi и до ~22° для стали. Фазовый состав стали в процессе лазерной обработки не изменяется, а на поверхности никелида титана после 420 с обработки регистрируются фазы, принадлежащие оксидам. Ультрафиолетовая лазерная обработка никелида титана и стали приводит к увеличению свободной поверхностной энергии, изменению соотношения ее составляющих (уменьшению дисперсной составляющей и значительному росту полярной составляющей) и увеличению содержания кислорода на поверхности обоих материалов. При длительных временах лазерного воздействия (более 420 с) на поверхности обрабатываемого материала происходят изменения морфологии и топографии, приводящие к увеличению шероховатости. Изменение топографии поверхности (шероховатости) никелида титана не оказывает заметного влияния на смачиваемость поверхности металлических материалов, а для стальных образцов наблюдается незначительная тенденция к снижению краевого угла смачивания с увеличением шероховатости. Степень гидрофильности металлических материалов, характеризующаяся краевым углом смачивания, с увеличением продолжительности лазерного воздействия повышается за счет насыщения поверхности свободным кислородом и увеличения свободной поверхностной энергии (ее полярной составляющей). На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что ультрафиолетовая лазерная обработка является эффективным способом изменения смачиваемости металлических материалов.

Для цитирования: Исследование гидрофильности поверхности металлических материалов, модифицированных ультрафиолетовым лазерным излучением / Т.Ю. Саблина, М.Ю. Панченко, И.А. Зятиков, А.В. Пучикин, И.Н. Коновалов, Ю.Н. Панченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 218–233. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-218-233.

Введение

Основными способами изменения свойств поверхности металлических материалов, используемых как в технике, так и в медицине, являются различные методы нанесения покрытий и различные виды поверхностной обработ-

*Адрес для переписки

Саблина Татьяна Юрьевна, к.т.н., инженер
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический, 2/3,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: +7 913 843-21-78, e-mail: sabltat@mail.ru

ки [1–5]. Поверхностная модификация с использованием концентрированных потоков энергии представляет собой одно из перспективных направлений в области создания новых технологий обработки металлических материалов, в том числе медицинского назначения (биоматериалов) [1, 6–10]. Основной целью поверхностной обработки металлических биоматериалов является получение на поверхности материала модифицированного слоя, имеющего специфические свойства. Такие поверхностные характеристики, как смачиваемость, поверхностная энергия, шероховатость, фазовый и химический состав, оказывают значительное влияние на биосовместимость материалов в физиологической среде. При этом и коррозионные свойства, и способность к интеграции биоматериалов в живые биологические ткани в большой степени зависят от смачиваемости этих материалов биологическими жидкостями, водными растворами солей и кислот [4, 6, 7, 9, 11, 12]. С точки зрения взаимодействия с биологическими жидкостями, клетками и тканями гидрофильная поверхность более предпочтительна, чем гидрофобная. Поверхность имплантатов с повышенной гидрофильностью дает более высокие показатели остеоинтеграции, т. е. взаимодействия биоматериала с костной тканью без участия соединительной ткани, чем обычные материалы [13].

Способность лазеров изменять поверхностные характеристики материала и, следовательно, его взаимодействие с окружающей средой вызвала большой интерес среди исследователей к использованию этой уникальной особенности для улучшения поведения материала в биологических средах [9, 11, 12, 14–17]. Преимуществом использования лазерного излучения для модификации поверхности различных материалов является то, что лазерное воздействие представляет собой экологически чистый, бесконтактный и относительно быстрый метод, который также характеризуется высокой точностью и возможностью локального воздействия. Регулируя параметры лазерного воздействия, можно избирательно изменять поверхность материала, не влияя на его внутреннюю структуру и объемные свойства. В настоящее время лазеры все чаще используются в качестве инструмента для модификации поверхности различных металлических материалов и устройств, используемых в том числе как

биомедицинские материалы в кардиологии, ортопедии и стоматологии [11, 18–20].

В работах [1, 5, 9, 11, 14, 18–22] отмечается, что лазеры в основном применяются для модификации поверхности металлических имплантатов с целью повышения остеоинтеграции, коррозионной стойкости и гидрофильности. Металлические биоматериалы на основе титана, его сплавов и нержавеющей стали используются при изготовлении искусственных сердечных клапанов, кардиостимуляторов, стентов для кровеносных сосудов, эндопротезов костей и суставов (плечевых, коленных, тазобедренных, локтевых), для реконструкции ушных раковин, в лицевой хирургии, а также в качестве стоматологических имплантатов. Они преобладают над другими классами биоматериалов благодаря синергетическому сочетанию превосходных механических свойств, коррозионной стойкости и износостойкости, а также долгосрочной биосовместимости [12, 14, 19, 20, 23, 24].

В последнее время активно изучается контролируемое лазерное воздействие для изменения топографии, морфологии и физико-химических свойств поверхности биоматериалов, в том числе с целью снижения бактериальной адгезии на поверхности имплантатов и, таким образом, настройки их биологических и других поверхностных свойств [11, 16, 17, 20, 22, 25]. Были проведены исследования *in vitro* и *in vivo* по оценке влияния лазерного воздействия на адгезию, рост и пролиферацию клеток, смачиваемость, твердость поверхности, механические свойства, морфологию поверхности, антибактериальные свойства и образование биопленки на поверхности имплантатов [13, 15–17, 20, 23, 25, 26].

Следует отметить, что в основном все исследования по лазерной обработке поверхности материалов, направленные на изменение ее морфологии, топографии и свойств, проведены с использованием излучения с длиной волны $\lambda = 1064$ нм или $\lambda = 532$ нм и высокими значениями плотности энергии или мощности [10, 15, 17, 25, 27]. Работ по исследованию влияния ультрафиолетового (УФ) лазерного излучения ($\lambda < 400$ нм) на поверхность материалов – единицы [20, 28, 29]. Однако, несмотря на многочисленные рекомендации по использованию лазерной обработки поверхности, до сих пор не хватает систематических и детальных исследо-

ваний влияния параметров лазерного излучения на структурно-фазовое состояние и свойства модифицированной поверхности металлических материалов.

Целью настоящей работы является исследование гидрофильности поверхности никелида титана и стали после УФ-лазерной обработки. Задачей исследования является проведение сравнительного анализа краевого угла смачивания, структуры, топографии, фазового и химического состава поверхности образцов из никелида титана и стали до и после лазерного воздействия при изменении продолжительности воздействия.

Методы исследований

Для исследования были взяты экспериментальные образцы в виде пластин с размерами $10 \times 10 \times 1,5$ мм (длина $\times$ ширина $\times$ толщина) из сплава на основе никелида титана TiNi (ТН-10), разработанные в НИИ медицинских материалов и имплантатов с памятью формы (г. Томск) (условное обозначение – TiNi) и нержавеющей стали 12Х18Н9Т (ГОСТ 5632–72; условное обозначение – сталь). Образцы предварительно шли-

фовали на SiC-шлифовальной бумаге различной зернистости Р600...2500 (ISO6344), а затем до глянца полировали алмазными пастами АСМ или АСН 3/2, 2/1, 1/0. Для удаления загрязнений ПАВ после полировки образцы промывали в ультразвуковой ванне (VGT-1620QTD, Китай) последовательно в спирте и ацетоне в течение 10 минут. Ультрафиолетовую лазерную обработку проводили на воздухе при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре (22 ± 3 °С). Экспериментальные образцы подвергали воздействию излучения 4-й гармоники Nd:YAG лазера Q-smart 850 (Quantel, Франция) на длине волны 266 нм, длительность импульсов составляла ~5 нс, частота следования импульсов – 10 Гц. Принципиальная схема лазерного воздействия приведена на рис. 1, а. Воздействие на материал осуществляли стационарно, без перемещения образца и пучка, при постоянной плотности энергии излучения, равной $0,1$ Дж/см², а продолжительность воздействия изменяли от 10 до 600 с. Площадь воздействия на поверхность экспериментальных образцов ограничивалась диаметром лазерного пучка $d = 0,5$ см (рис. 1, б).

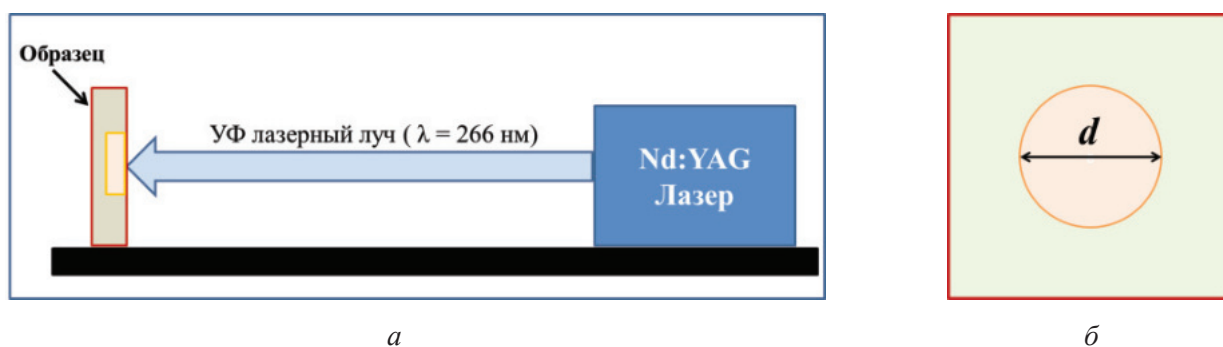


Рис. 1. Схема УФ-лазерной обработки поверхности образцов

Fig. 1. Experimental scheme of UV laser treatment on the sample surface

До и после УФ-лазерной обработки определяли смачиваемость поверхности материалов методом лежащей капли тестовых жидкостей (деионизированная вода, глицерин) с известными свойствами поверхностной энергии по краевому (контактному) углу смачивания. Измерение краевого угла смачивания осуществляли с помощью фотофиксации капли на поверхности материала. Для этого каплю жидкости объемом 3 мкл из микропипетки наносили на горизонтальную

поверхность металлического материала, после чего каплю фотографировали так, чтобы оптическая ось совпадала с плоскостью поверхности материала с каплей. На полученных фотографиях измеряли высоту h и длину базовой линии $2r$ капли (рис. 2), по которым полуугловым методом по приведенным ниже формулам рассчитывали краевой угол смачивания (Θ):

$$\Theta_1 = \text{tg}^{-1} h / r; \quad (1)$$

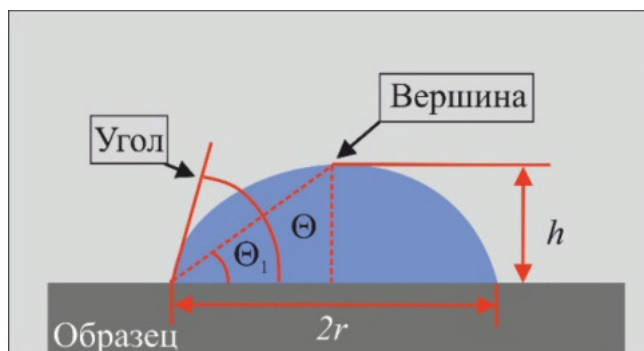


Рис. 2. Схема определения краевого угла смачивания

Fig. 2. Scheme of measuring the wetting contact angle

$$\Theta = 2\Theta_1, \quad (2)$$

где h – высота; r – половина длины базовой линии.

Было проведено не менее пяти серий измерения краевого угла смачивания для исходной поверхности и для каждого режима облучения.

Свободную поверхностную энергию γ_s материала до и после лазерного воздействия определяли методом Оунса – Вендта – Рабеля – Кьельбле (ОВРК) [30], используя известные справочные данные поверхностного натяжения, дисперсной составляющей γ_d и полярной составляющей γ_p тестовых жидкостей (воды и глицерина), а также полученные данные по краевому углу смачивания.

Исследования топографии поверхности никелида титана и стали до и после лазерного воздействия проводили контактным методом с помощью профилометра для трибологических испытаний (Tt-Tribotechnic, Франция), оснащенного алмазной иглой с высоким разрешением (7,55 нм по оси Z) без скользящего элемента. Шероховатость Ra , усредненную по всей длине базовой линии, равной 3 мм, измеряли в соответствии с ГОСТ 2789–73. Проводили не менее пяти измерений для каждого образца. Структуру и элементный состав поверхности материалов до и после облучения оценивали по данным, полученным с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VEGA 3 TESCAN (Чехия), оснащенного энергодисперсионным анализатором (ЭДС). Фазовый состав образцов TiNi и стали в исходном состоянии и после лазерного воздействия определяли по дифрактограммам, полученным на рентгеновском дифрактометре

типа ДРОН («Буревестник», г. Санкт-Петербург, Россия) с фильтрованным $\text{CuK}\alpha$ -излучением в интервале углов сканирования 2Θ от 30° до 110° . Качественный и количественный анализ рентгеновских дифрактограмм проводили с использованием программных пакетов PDWin и CDA (ОАО «Буревестник», г. Санкт-Петербург, Россия).

Результаты и их обсуждение

Измерение и определение контактного угла смачивания деионизированной водой является наиболее простым методом исследования смачиваемости поверхности материалов. На рис. 3 приведены графики зависимости контактного угла смачивания поверхностей никелида титана и стали от продолжительности УФ-лазерного воздействия. На вставках (рис. 3) представлены характерные фото капель воды на поверхности образцов до и после лазерного воздействия. В исходном состоянии значения краевого угла смачивания для образцов никелида титана и стали близки и составляют $75,0 \pm 5,1^\circ$ для образцов TiNi и $75,4 \pm 5,4^\circ$ для стальных образцов. Ультрафиолетовое лазерное воздействие на поверхность металлических материалов приводит к изменению гидрофильности поверхности образцов как никелида титана, так и стали. Контактный угол смачивания уменьшается с увеличением продолжительности УФ-лазерного воздействия. Уже после 10 с воздействия наблюдается значительное уменьшение контактного угла смачивания для обоих материалов по сравнению с исходным состоянием. Для никелида титана контактный угол смачивания уменьшается более чем в два раза, а для стальных образцов происходит снижение примерно на 30 %. Резкое уменьшение контактного угла смачивания происходит вплоть до 120 с воздействия на материал. С дальнейшим увеличением продолжительности воздействия контактный угол смачивания для образцов TiNi практически не изменяется и составляет $11...13^\circ$, а для стальных образцов постепенно снижается до минимального значения $22,6 \pm 4,2^\circ$ при воздействии в течение 600 с. Как видно из рис. 3, во-первых, при увеличении продолжительности УФ-лазерной обработки наблюдаются различия в кинетике изменения контактного угла смачивания для TiNi и стали. При

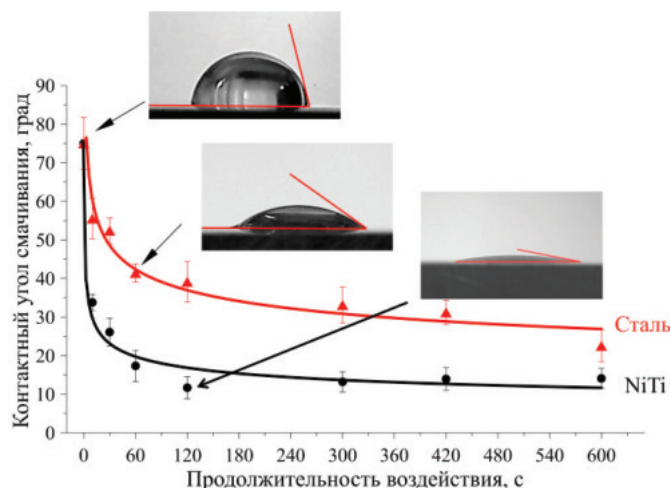


Рис. 3. Зависимость контактного угла смачивания от продолжительности УФ-лазерного воздействия

Fig. 3. The dependence of contact wetting angle on the duration of UV laser treatment

увеличении времени лазерного воздействия контактный угол смачивания TiNi изменяется быстрее и эффективнее по сравнению со сталью. Во-вторых, минимальные значения контактного угла также различаются. При одинаковой продолжительности ультрафиолетового лазерного воздействия контактный угол смачивания образцов TiNi в 1,5...2 раза ниже, чем у стальных образцов.

Таким образом, ультрафиолетовая лазерная обработка поверхности образцов никелида титана и стали эффективно меняет их гидрофильность, причем при одинаковых параметрах лазерной обработки сплав TiNi становится более гидрофильным, чем сталь. Поскольку смачиваемость материалов регулируется тонким поверхностным слоем (первыми атомными слоями поверхности), то любое изменение физико-химических свойств поверхности может на нее влиять [31]. На сегодняшний день у исследователей нет единого мнения о механизмах изменения гидрофильности при различных методах модификации поверхности. Существует множество гипотез о причинах изменения степени гидрофильности материалов, и они часто противоречивы. На смачиваемость поверхности большое влияние оказывают фазовый и химический состав поверхности, фактор микрогеометрии поверхности, ее текстура, шероховатость, структура, а также полярность поверхности, которая является одной из важных характеристик,

влияющей на сродство к воде [21, 22, 27, 32]. По одной из гипотез уменьшение контактного угла смачивания, т. е. увеличение степени гидрофильности, может происходить в результате очистки поверхности материалов от органических загрязнений [4, 33–35]. С одной стороны, известно, что контаминация поверхности металлов органическими соединениями с преобладанием углеводородных групп в молекуле приводит к гидрофобизации поверхности, поэтому удаление с поверхности материалов органических загрязнителей может приводить к умеренному увеличению гидрофильности поверхности [35]. В то же время в ряде работ сообщается об отсутствии влияния очистки поверхности от органических загрязнений на ее гидрофильность [36, 37]. С другой стороны, оксиды металлов обладают повышенной гидрофильностью и могут химически изменять смачиваемость поверхности из-за их сильного сродства к гидроксильрованию [27, 38]. Повышение степени гидрофильности может также происходить за счет процесса фотоокисления при обработке поверхности материалов [35]. В частности, диоксид титана при воздействии УФ-излучения становится супергидрофильным за счет своей фотокаталитической активности [39]. В работах [26, 40] сообщается о лазерном оксидировании металлических поверхностей при облучении как в воде, так и на воздухе, что связано с возможными процессами возбуждения, ионизации и диссоциации атмосферного кислорода. Известно, что лазерная обработка, вызывая окисление поверхности и повышая содержание кислорода на обработанных поверхностях, может способствовать увеличению их гидрофильности [27]. При этом тонкая окисная пленка, существующая на поверхности металлов, не защищает материал от дальнейшего взаимодействия с кислородом [15, 41–43]. Таким образом, в нашем случае изменение степени гидрофильности металлических материалов может быть также связано с насыщением поверхности атмосферным кислородом и ее окислением.

Данные по изменению количества кислорода на поверхности никелида титана и стали после лазерного облучения, полученные с помощью ЭДС при РЭМ-исследовании структуры, и данные рентгенофазового анализа (РФА), представленные на рис. 4–7, свидетельствуют о насы-

щении поверхности металлических материалов кислородом и образованием окисной пленки при ультрафиолетовой лазерной обработке.

На рис. 4 и 5 приведены РЭМ-изображения образцов TiNi с результатами ЭДС-анализа в исходном состоянии и после лазерной обработки.

По данным растровой электронной микроскопии структура никелида титана состоит из матрицы TiNi (светлые области) и небольшого количества включений – частиц TiC (темные области) (рис. 4, а). Элементный состав матрицы представлен в основном Ti и Ni в соотношении, близком к эквиаtomному, и незначительным количеством Mo и Fe, легирующих сплав TiNi-10; в составе матрицы также присутствует углерод и небольшое количество кислорода. Частицы включений содержат Ti, C и Ni (рис. 4, б). После 300 с лазерной обработки наблюдается повышение количества кислорода

в ≈ 10 раз (рис. 4, в), а дальнейшее увеличение продолжительности обработки до 600 с приводит к еще более значительному росту количества кислорода на поверхности материала (рис 4, г). Для стальных образцов при продолжительности УФ-лазерной обработки 60...300 с наблюдаются незначительные изменения в концентрации кислорода на поверхности, а после обработки в течение 600 с содержание кислорода увеличивается до ≈ 13 ат. %. (рис. 5).

То есть УФ-лазерная обработка приводит к повышению количества кислорода на поверхности. Сравнивая количество кислорода на поверхности экспериментальных образцов TiNi и стали после УФ-лазерного воздействия, можно отметить, что при одинаковых условиях обработки концентрация кислорода на поверхности образцов TiNi существенно выше по сравнению со стальными образцами. Это может быть связано с тем, что сплав TiNi содержит значитель-

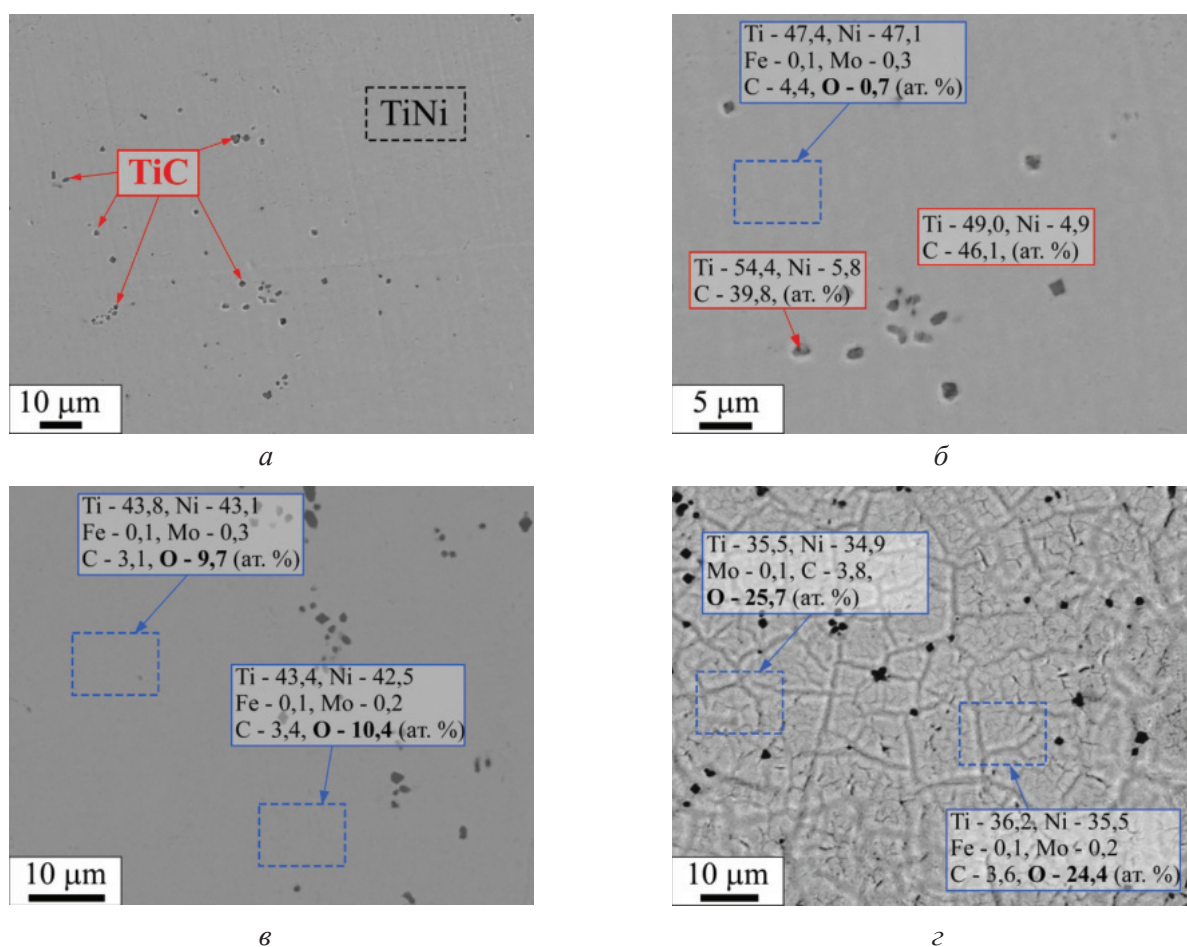


Рис. 4. РЭМ-изображения образцов TiNi с результатами ЭДС-анализа до (а, б) и после УФ-лазерной обработки с продолжительностью воздействия 300 с (в), 600 с (г)

Fig. 4. SEM images of TiNi specimens with the results of EDS analysis before (a, б) and after UV laser treatment with an exposure time of 300 s (в), 600 s (г)

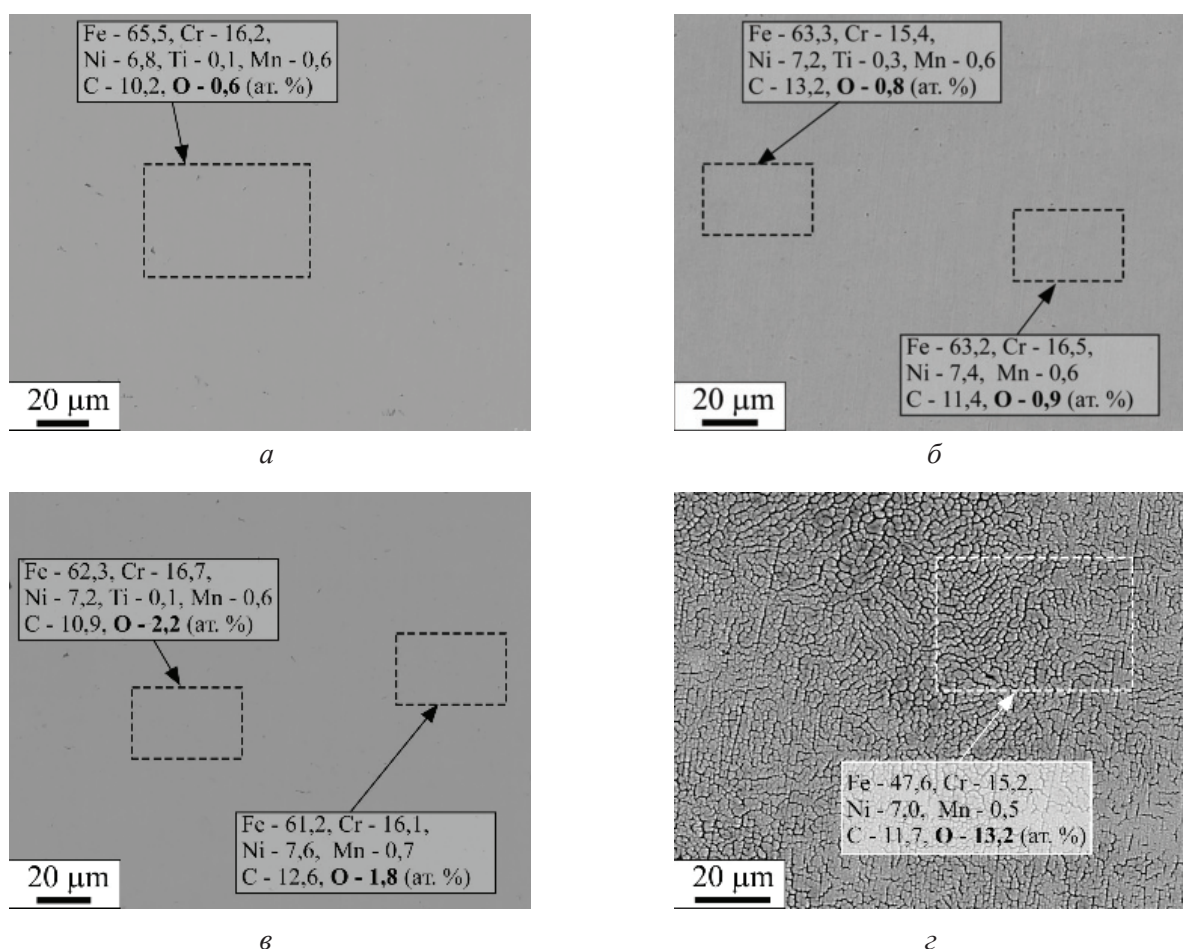


Рис. 5. РЭМ-изображения образцов стали с результатами ЭДС-анализа: исходная поверхность (а), поверхность после УФ-лазерной обработки в течение 60 с (б), 420 с (в), 600 с (з)

Fig. 5. SEM images of steel specimens with the results of EDS analysis: initial surface (a), surface after UV laser treatment for 60 s (б), 420 s (в), 600 s (з)

ное количество титана, который имеет более высокую электроотрицательность, и это делает его более реакционноспособным в присутствии кислорода. Титан легче теряет свои электроны и образует оксиды, чем железо, хром и никель в нержавеющей стали. Вместе с тем титан может вызывать образование более стабильных оксидов (например, TiO_2), чем традиционные оксиды, образующиеся в нержавеющей стали. При этом оксидная пленка TiO_2 имеет более упорядоченную и компактную структуру по сравнению с оксидами, образующимися на поверхности нержавеющей стали (например, оксидами хрома).

Из рис. 4, з и 5, з можно также видеть, что после 600 с обработки происходят изменения в морфологии поверхности никелида титана и стали, при этом формируются различные поверхностные текстуры. На поверхности $TiNi$ зафиксировано образование сетки трещин. Микро-растрескивание тонкого поверхностного слоя

при длительной лазерной обработке, вероятнее всего, обусловлено влиянием зоны термического воздействия в процессе локального нагрева при лазерном воздействии и резкого охлаждения после окончания воздействия и связано с термическим градиентом и напряжениями, возникающими в результате быстрого охлаждения поверхности обработанного материала. Микро-растрескивание также может быть вызвано разницей коэффициентов линейного теплового расширения основного материала и оксида металла, образовавшегося на поверхности металла при лазерном воздействии.

В отличие от никелида титана на поверхности стального образца после 600 с УФ-лазерной обработки происходит формирование «зернистой» структуры. В работе [31] на поверхности стали 316L при лазерном облучении с длиной волны $\lambda = 532$ нм и плотностью потока лазерного излучения $1,1 \text{ Дж/см}^2$ получены

аналогичные зернистые структуры, формирование которых обусловлено быстрым затвердеванием расплавленной зоны после абляции. Образование подобной структуры на поверхности стали при УФ-лазерном воздействии тоже может быть вызвано тепловыми процессами, такими как плавление и испарение материала. Разная морфология поверхности после УФ-лазерной обработки в одинаковых условиях для образцов TiNi и стали связана с их разными теплофизическими и химическими свойствами. Микрорастрескивание на поверхности никелида титана и формирование зернистой структуры в стали приводят к увеличению шероховатости Ra поверхности образцов, о чем свидетельствуют данные измерения шероховатости поверхности металлических материалов до и после лазерного воздействия. В исходном состоянии Ra поверхности никелида титана составляет $40,9 \pm 5,27$ нм, а для стальных образцов $Ra = 27,7 \pm 5,3$ нм. Длительное УФ-лазерное воздействие (600 с) приводит к росту шероховатости в два раза и более: Ra увеличивается до $82,3 \pm 5,31$ нм для никелида титана и до $64,3 \pm 6,2$ нм для стали. Изменение топографии поверхности (шероховатости) не оказывает заметного влияния на смачиваемость поверхности никелида титана, а для стальных

образцов наблюдается незначительная тенденция к снижению контактного угла смачивания с увеличением шероховатости. Полученные результаты согласуются с данными работ [20, 27], где отмечается комплексное влияние шероховатости и химии поверхности на изменение степени гидрофильности и биосовместимости.

Подтверждением образования на поверхности никелида титана окисной пленки после УФ-лазерной обработки также служат данные, полученные с помощью рентгеновской дифрактометрии. На рис. 6, 7 представлены рентгенограммы образцов никелида титана и стали до и после лазерной обработки. На рентгенограмме 1-го исходного образца TiNi (рис. 6, а) и рентгенограммах 2, 3, 4-го образцов, подвергнутых УФ-лазерной обработке с продолжительностью воздействия от 10, 120, 300 с (рис. 6, а), присутствуют только пики В2-фазы TiNi ($Ti_{49,5}Ni_{50,5}$) и примесной фазы TiC, образующейся в процессе изготовления материала, объемная доля которой составляет 5–7 %. Рентгенограмма 5, полученная с образца никелида титана после 600 с УФ-лазерной обработки (рис. 6, а), свидетельствует об изменении фазового состава. Кроме основной фазы В2 (TiNi) и примесной TiC-фазы на рентгенограмме регистрируются пики, соответствующие оксидам TiO_2 и $Ti_4Ni_2O_x$ (рис. 6, б).

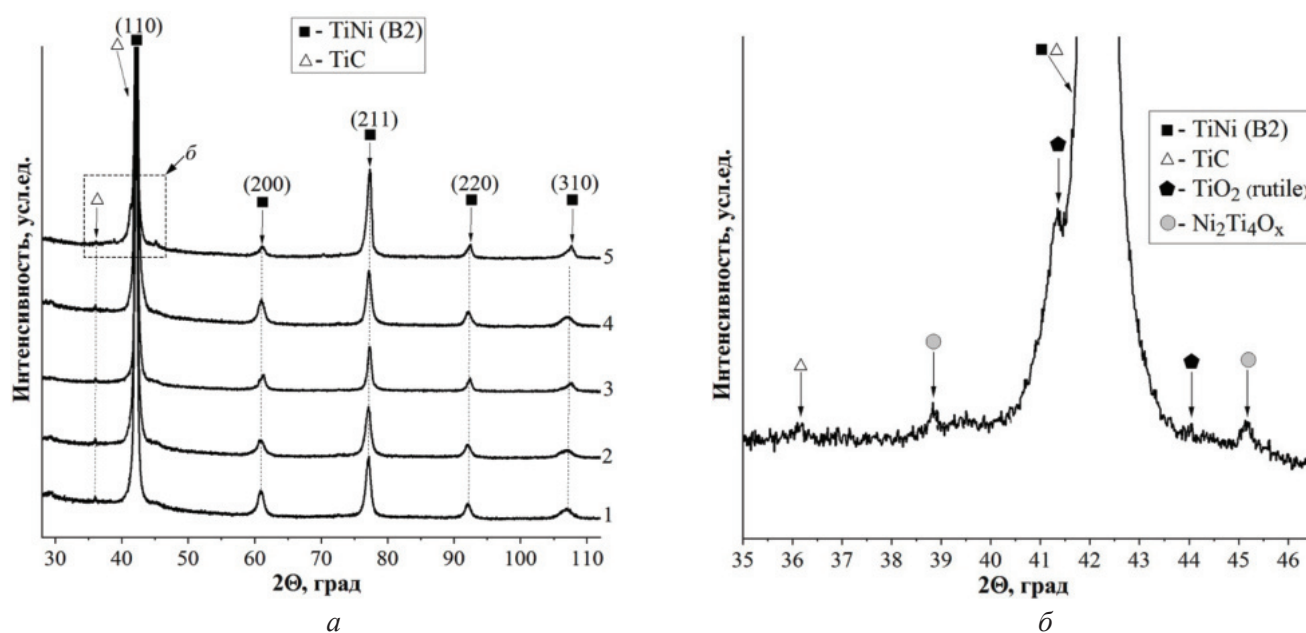


Рис. 6. Рентгенограммы образцов TiNi в исходном состоянии (а, 1) и после УФ-лазерной обработки в течение 60 с (а, 2), 120 с (а, 3), 300 с (а, 4) и 600 с (а, 5; б)

Fig. 6. XRD patterns of TiNi initial specimens (a, 1) and after UV laser treatment for 60 (a, 2), 120 (a, 3), 300 (a, 4) and 600 s (a, 5; б)

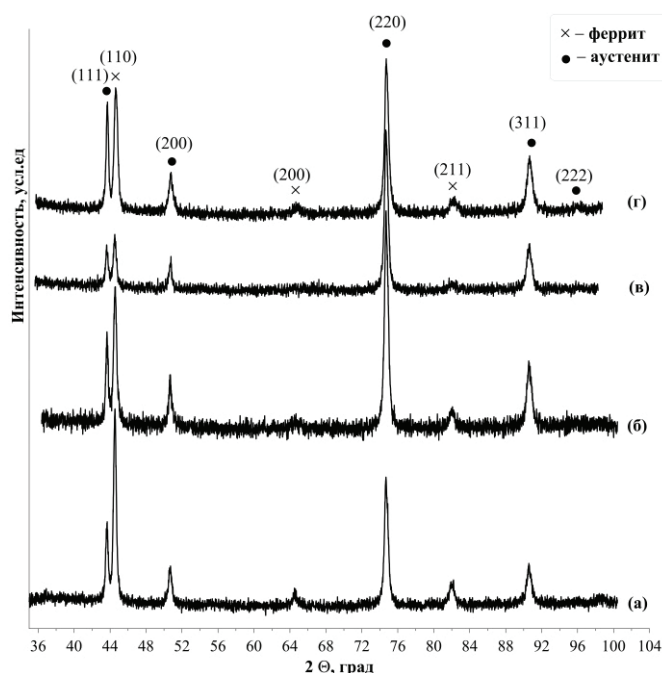


Рис. 7. Рентгенограмма образцов стали до (а) и после УФ-лазерной обработки в течение 60 с (б), 420 с (в) и 600 с (г)

Fig. 7. XRD patterns of steel specimens before (a) and after UV laser treatment for 60 (b), 420 (v) and 600 s (z)

Оксидные фазы, идентифицируемые на поверхности образца никелида титана после длительной лазерной обработки, вероятнее всего, присутствуют и на поверхности как исходного образца, так и образцов с небольшой продолжи-

тельностью лазерного воздействия, о чем свидетельствуют данные по содержанию кислорода на поверхности, полученные с помощью ЭДС. По-видимому, небольшая толщина окисной пленки (не более 20 нм в соответствии с [41–43]) и незначительное количество оксидов, не превышающее 3%-го порога чувствительности метода рентгеновской дифракции, не позволяют выявить оксиды на поверхности никелида титана методом РФА. На рентгенограммах стали (рис. 7) до и после лазерной обработки зафиксированы только фазы, идентифицируемые как аустенит и феррит железа в соотношении 75:25. Даже при УФ-лазерной обработке в течение 600 с не удалось выявить фаз, принадлежащих оксидам, методом РФА в стальных образцах, что также может быть обусловлено ограничениями метода рентгеновской дифракции.

Предполагается, что выявленные поверхностные изменения исследуемых материалов в результате лазерного воздействия повлияют на свободную поверхностную энергию. На рис. 8 приведены зависимости свободной поверхностной энергии для никелида титана (рис. 8, а) и стали (рис. 8, б) от продолжительности УФ-лазерного воздействия. Для обоих материалов с увеличением продолжительности УФ-лазерного воздействия наблюдается значительный рост свободной поверхностной энергии.

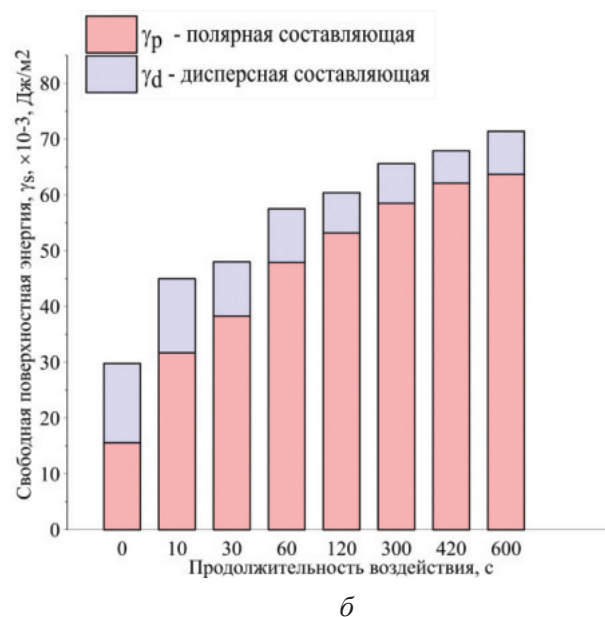
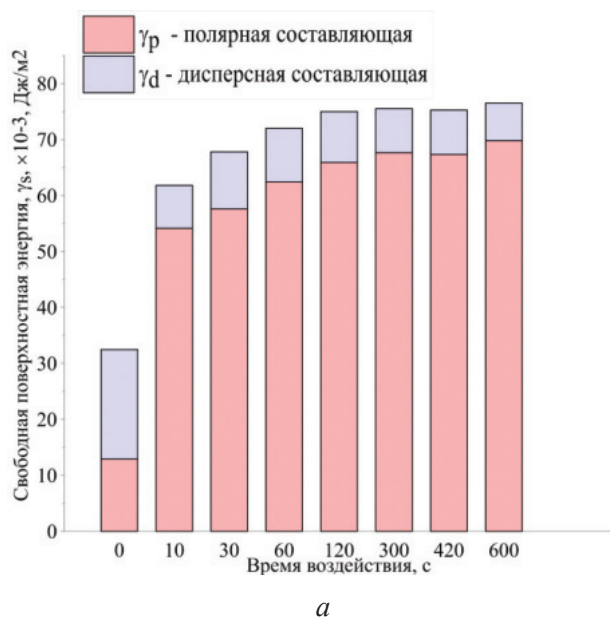


Рис. 8. Свободная поверхностная энергия γ_s и ее составляющие (полярная γ_p и дисперсная γ_d) TiNi (а) и стали (б) в зависимости от продолжительности УФ-лазерной обработки

Fig. 8. Free surface energy γ_s and its components (polar γ_p and dispersed γ_d) of TiNi (a) and steel (b) vs the duration of UV laser treatment

После лазерного облучения происходит изменение соотношения дисперсной γ_d и полярной γ_p составляющих поверхностной энергии. Если в исходном состоянии для обоих материалов соотношение γ_p/γ_d составляло примерно 50/50, то после облучения наблюдается снижение (более чем в два раза) дисперсной составляющей и значительный рост полярной составляющей. С увеличением продолжительности лазерного воздействия значение дисперсной составляющей γ_d меняется незначительно и не превышает 10 мДж/м², в то время как значение полярной составляющей γ_p увеличивается в 2...5 раз.

Такой значительный рост полярной составляющей свидетельствует об активации поверхности в результате лазерного воздействия и указывает на наличие на поверхности полярных функциональных групп (-ОН, оксиды, карбоксилы), которые способны образовывать водородные связи с молекулами жидкости и способствуют повышению гидрофильности.

Таким образом, увеличение свободной поверхностной энергии и значительный рост ее полярной составляющей при УФ-лазерной обработке как образцов TiNi, так и стальных образцов связаны с насыщением поверхности металлических материалов атмосферным кислородом и ее дополнительным окислением, а также с формированием на поверхности ориентированного слоя, в котором полярные группы молекул, отвечающие за генерацию полярной составляющей, обращены в воздух.

Выводы

1. В работе установлено, что ультрафиолетовая лазерная обработка поверхности образцов из никелида титана и стали приводит к повышению гидрофильности. В исходном состоянии контактный угол смачивания составляет $\approx 75^\circ$ для обоих материалов, а после УФ-лазерной обработки он снижается до $11...13^\circ$ для TiNi и $\approx 22^\circ$ для стали.

2. С увеличением продолжительности УФ-лазерной обработки на поверхности металлических материалов регистрируется повышение количества кислорода в 10 и более раз по сравнению с исходным состоянием. Длительная лазерная обработка (600 с) также вызывает изменение морфологии поверхности обрабатываемых материалов и увеличение шероховатости.

3. Ультрафиолетовая лазерная обработка поверхности металлических материалов приводит к увеличению свободной поверхностной энергии от 32,4 до 76,5 мДж/м² для TiNi образцов и от 29,8 до 71,4 мДж/м² для стальных образцов за счет значительного роста полярной составляющей.

Основными факторами повышения гидрофильности образцов TiNi и стали 12X18P9T после УФ-лазерной обработки являются увеличение содержания кислорода, образование оксидных фаз и значительное увеличение полярной составляющей свободной поверхностной энергии.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что ультрафиолетовая лазерная обработка является эффективным способом изменения смачиваемости поверхности металлических материалов.

Список литературы

1. Slobodyan M.S., Markov A.B. Laser and electron-beam surface processing on TiNi shape memory alloys: a review // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67 (5). – P. 565–615. – DOI: 10.1007/s11182-024-03158-5.
2. Исследование структурно-фазового состояния и механических свойств покрытий ZrCrN, полученных вакуумно-дуговым методом / А.В. Филиппов, Н.Н. Шамарин, Е.Н. Москвичев, О.С. Новицкая, Е.О. Княжев, Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, В.В. Денисов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 87–102. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102.
3. The influence of surface treatment on wettability of TiNi-based alloy / Y.F. Yasenchuk, S.V. Gunther, O.V. Kokorev, E.S. Marchenko, V. Gunther, G.A. Baigonakova, K.M. Dubovikov // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62 (2). – P. 333–338. – DOI: 10.1007/s11182-019-01716-w.
4. Surface treatment of metals in the plasma of a nanosecond diffuse discharge at atmospheric pressure / M. Erofeev, V. Ripenko, M. Shulepov, V. Tarasenko // The European Physical Journal D: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2017. – Vol. 71. – Art. 117. – DOI: 10.1140/epjd/e2017-70636-6.
5. Research progress of metal biomaterials with potential applications as cardiovascular stents and their surface treatment methods to improve biocompatibility / X. Duan, Y. Yang, T. Zhang, B. Zhu, G. Wei, H. Li // Heliyon. – 2024. – Vol. 10 (4). – P. e25515. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25515.
6. Kolobov Yu.R. Nanotechnologies for the formation of medical implants based on titanium alloys with

- bioactive coatings // *Nanotechnologies in Russia*. – 2009. – Vol. 4 (11–12). – P. 758–775. – DOI: 10.1134/S1995078009110020.
7. Studying the influence of nanosecond pulsed laser action on the structure of submicrocrystalline titanium / Y.R. Kolobov, S.S. Manokhin, G.V. Odintsova, V.I. Betekhtin, A.G. Kadomtsev, M.V. Narykova // *Technical Physics Letters*. – 2021. – Vol. 47. – P. 721–725. – DOI: 10.1134/S1063785021070245.
8. *Ionin A.A., Kudryashov S.I., Samokhin A.A.* Material surface ablation produced by ultrashort laser pulses // *Physics-Uspekhi*. – 2017. – Vol. 60. – P. 149–160. – DOI: 10.3367/UFNe.2016.09.037974.
9. *Razi S., Mollabashi M., Madanipour K.* Laser processing of metallic biomaterials: an approach for surface patterning and wettability control // *The European Physical Journal Plus*. – 2015. – Vol. 130 (12). – Art. 247. – DOI: 10.1140/epjp/i2015-15247-5.
10. *Mironov Yu.P., Meisner L.L., Lotkov A.I.* The structure of titanium nickelide surface layers formed by pulsed electron-beam melting // *Technical Physics*. – 2008. – Vol. 53 (7). – P. 934–942. – DOI: 10.1134/S1063784208070189.
11. LASER as a tool for surface modification of dental biomaterials: a review / R. Saran, K. Ginjupalli, S.D. George, S. Chidangil, V.K. Unnikrishnan // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9 (6). – P. e17457. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17457.
12. *Ajmal S., Hashmi F.A., Imran I.* Recent progress in development and applications of biomaterials // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 62 (1). – P. 385–391. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.233.
13. Enhanced bone apposition to a chemically modified SLA titanium surface / D. Buser, N. Broggini, M. Wieland, R.K. Schenk, A.J. Denzer, D.L. Cochran, B. Hoffmann, A. Lussi, S.G. Steinemann // *Journal of Dental Research*. – 2004. – Vol. 83. – P. 529–533. – DOI: 10.1177/154405910408300704.
14. Graded functionality obtained in NiTi shape memory alloy via a repetitive laser processing strategy / Y. Yang, Z.G. Wu, B.Y. Shen, M.Z. Wu, Z.S. Yuan, C.Y. Wang, L.C. Zhang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 296. – P. 117177. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117177.
15. Surface characterizations of laser modified biomedical grade NiTi shape memory alloys / A. Pequegnat, A. Michael, J. Wang, K. Lian, Y. Zhou, M.I. Khan // *Materials Science and Engineering: C*. – 2015. – Vol. 50. – P. 367–378. – DOI: 10.1016/j.msec.2015.01.085.
16. The effect of fs-laser micromachining parameters on surface roughness, bio-corrosion and biocompatibility of nitinol / V. Chenrayan, V. Vaishnav, K. Shahapurkar, P. Dhanabal, M. Kalayarasan, S. Raghunath, M. Mano // *Optics and Laser Technology*. – 2024. – Vol. 170. – P. 110200. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110200.
17. Biocompatibility of the micro-patterned NiTi surface produced by femtosecond laser / C. Liang, H. Wang, J. Yang, B. Li, Y. Yang, H. Li // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 261. – P. 337–342. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.08.011.
18. Surface microtexturing of Ti–6Al–4V using an ultraviolet laser system / W.-T. Hsiao, H.-C. Chang, A. Nanci, R. Durand // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 90. – P. 891–895. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.11.039.
19. *Benay U.-Y.* Mechanical performance of metallic biomaterials: fundamentals and mechanism // *Multiscale cell-biomaterials interplay in musculoskeletal tissue engineering and regenerative medicine* / ed. by J. Miguel Oliveira, R.L. Reis, S. Pina. – Academic Press, 2024. – Ch. 5. – P. 113–126. – ISBN 978-0-323-91821-3. – DOI: 10.1016/B978-0-323-91821-3.00011-6.
20. Biocompatibility of micro/nanostructures nitinol surface via nanosecond laser circularly scanning / S. Li, Z. Cui, W. Zhang, Y. Li, L. Li, D. Gong // *Materials Letters*. – 2019. – Vol. 255. – P. 126591. – DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126591.
21. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air / J. Long, M. Zhong, H. Zhang, P. Fan // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2015. – Vol. 441. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.jcis.2014.11.015.
22. *Razi S., Mollabashi M., Madanipour K.* Improving the hydrophilicity of metallic surfaces by nanosecond pulsed laser surface modification // *Journal of Laser Applications*. – 2015. – Vol. 27 (4). – P. 042006–1–042006–9. – DOI: 10.2351/1.4928290.
23. *Es-Souni M., Es-Souni M., Fischer-Brandies H.* Assessing the biocompatibility of TiNi shape memory alloys used for medical applications // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. – 2005. – Vol. 381. – P. 557–567. – DOI: 10.1007/s00216-004-2888-3.
24. *Shabalovskaya S.A.* Physicochemical and biological aspects of nitinol as a biomaterial // *International Materials Reviews*. – 2001. – Vol. 46. – P. 233–250. – DOI: 10.1179/095066001771048745.
25. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance / Q. Zhang, J. Dong, M. Peng, Z. Yang, Y. Wan, F. Yao, J. Zhou, C. Ouyang, X. Deng, H. Luo // *Materials Science and Engineering: C*. – 2020. – Vol. 111. – P. 110847. – DOI: 10.1016/j.msec.2020.110847.
26. Structure formation on titanium during oxidation induced by cumulative pulsed Nd:YAG laser irradiation / E. György, A. Pérez del Pino, P. Serra, J.L. Morenza // *Applied Physics, A, Materials Science & Processing*. – 2004. – Vol. 78 (5). – P. 765–770. – DOI: 10.1007/s00339-002-2054-8.



27. Fabrication of superhydrophilic surface on metallic nickel by sub-nanosecond laser-induced ablation / H.-Z. Zhu, H.-C. Zhang, X.-W. Ni, Z.-H. Shen, J. Lu // *AIP Advances*. – 2019. – Vol. 9 (8). – P. 085308. – DOI: 10.1063/1.5111069.

28. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy / Y. Wang, M. Zhang, K. Li, J. Hu // *Optics and Laser Technology*. – 2021. – Vol. 139. – P. 106987. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106987.

29. Surface morphology modifications of titanium based implant induced by 40 picosecond laser pulses at 266nm / D.S. Milovanović, B. Radak, B.M. Gaković, D. Batani, M.D. Momčilović, M.S. Trtica // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 501 (1). – P. 89–92. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.04.047.

30. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1969. – Vol. 13 (8). – P. 1741–1747. – DOI: 10.1002/app.1969.070130815.

31. Razi S., Madanipour K., Mollabashi M. Laser surface texturing of 316L stainless steel in air and water: a method for increasing hydrophilicity via direct creation of microstructures // *Optics & Laser Technology*. – 2016. – Vol. 80. – P. 237–246. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.12.022.

32. Nanopatterned metallic surfaces: their wettability and impact on ice friction / A. Kietzig, M. Mirvakili, S. Kamal, P. Englezos // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2011. – Vol. 25. – P. 1293–1303.

33. Dynamics of titanium surface characteristics after its treatment by runaway electron preionized diffuse discharge / M.A. Shulepov, M.V. Erofeev, V.S. Ripenko, V.F. Tarasenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 830. – P. 012090. – DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012090.

34. Surface XPS characterization of NiTi shape memory alloy after advanced oxidation processes in UV/H₂O₂ photocatalytic system / R.M. Wang, C.L. Chu, T. Hu, Y.S. Dong, C. Guo, X.B. Sheng, P.H. Lin, C.Y. Chung, P.K. Chu // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 253 (20). – P. 8507–8512. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.04.018.

35. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2005. – Vol. 44 (12). – P. 8269–8285. – DOI: 10.1143/JJAP.44.8269.

36. Photoinduced surface reactions on TiO₂ and SrTiO₃ films: photocatalytic oxidation and photoinduced hydrophilicity / M. Miyauchi, A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto, T. Watanabe // *Chemistry of Materials*. – 2000. – Vol. 12. – P. 3–5. – DOI: 10.1021/cm990556p.

37. Photocatalysis and photoinduced hydrophilicity of various metal oxide thin films / M. Miyauchi, A. Nakajima, T. Watanabe, K. Hashimoto // *Chemistry of Materials*. – 2002. – Vol. 14. – P. 2812–2816. – DOI: 10.1021/cm020076p.

38. Gentleman M.M., Ruud J.A. Role of hydroxyls in oxide wettability // *Langmuir*. – 2010. – Vol. 26 (3). – P. 1408–1411. – DOI: 10.1021/la903029c.

39. Рудакова А.В., Емелин А.В. Фотоиндуцированное изменение гидрофильности поверхности тонких пленок // *Коллоидный журнал*. – 2021. – Т. 83 (1). – С. 3–34. – DOI: 10.31857/S0023291221010109.

40. Surface oxidation phenomenon and mechanism of AISI 304 stainless steel induced by Nd:YAG pulsed laser / C.Y. Cui, X.G. Cui, X.D. Ren, M.J. Qi, J.D. Hu, Y.M. Wang // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 305. – P. 817–824.

41. In vitro biocompatibility of the surface ion modified NiTi alloy / E. Gudimova, L. Meisner, A. Lotkov, V. Matveeva, S. Meisner, A. Matveev, O. Shabalina // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1783. – P. 020071. – DOI: 10.1063/1.4966364.

42. The structure of the NiTi surface layers after the ion-plasma alloying of Ta / T.M. Poletika, S.L. Girsova, L.L. Meisner, E.Yu. Schmidt, S.N. Meisner // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683 (1). – P. 020183. – DOI: 10.1063/1.4932873.

43. Structure and chemical state of oxide films formed on crystalline TiNi alloy and glassy Ti-Ni-Ta-Si surface alloy / V.O. Semin, E.Y. Gudimova, S.Y. Timoshevskaya, E.V. Yakovlev, A.B. Markov, L.L. Meisner // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. – Vol. 32. – P. 8478–8492. – DOI: 10.1007/s11665-022-07727-y.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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 - Metal Working and Material Science

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



Study of surface hydrophilicity of metallic materials modified by ultraviolet laser radiation

Tatyana Sablina^{a, *}, Marina Panchenko^b, Ilya Zyatikov^c, Aleksey Puchikin^d,
Ivan Konovalov^e, Yurii Panchenko^f

Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5941-5732>, sablta@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-0236-2227>, panchenko.marina4@gmail.com;
^c <https://orcid.org/0000-0003-3219-9299>, zyatikov@lgl.hcei.tsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-6931-9800>, puchikin@lgl.hcei.tsc.ru;
^e <https://orcid.org/0000-0002-1166-1416>, ivan@lgl.hcei.tsc.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-8017-7268>, yu.n.panchenko@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 September 2024

Revised: 05 October 2024

Accepted: 14 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Ultraviolet laser radiation

Surface

Laser treatment

Hydrophilicity

TiNi alloy

Stainless steel

Contact angle

Funding

This work was carried out with the financial support of Russian Federation represented by Ministry of Science and Higher Education (project No. 075-15-2021-1348).

ABSTRACT

Introduction. Surface modification using laser radiation is a promising direction in the field of creating new technologies for treatment metal materials, including those for medical purposes. The ability of lasers to change the surface characteristics of a material and, consequently, its interaction with the environment has attracted great interest among researchers. Despite numerous recommendations for the use of laser surface treatment, there is still lack of systematic and detailed studies on the influence of parameters on the structural-phase state and properties of the modified surface, especially concerning ultraviolet laser exposure. The **purpose** of this work is to study the hydrophilicity of the surface of TiNi alloy and stainless steel after UV laser treatment. **Materials and methods of the study:** experimental samples made of TiNi (TN-10) alloy and 12KH18N9T (AISI 321) stainless steel were locally (beam diameter 0.5 cm) exposed to a solid-state Nd:YAG laser at the wavelength of 266 nm, with a pulse duration of ~5 ns, and pulse repetition rate of 10 Hz. The material was exposed to a constant output radiation energy density of 0.1 J/cm², with a change in the exposure duration from 10 to 600 s. Before and after UV laser treatment, the wettability of the material surface and free surface energy were determined. The structure, elemental and phase composition, and surface topography of TiNi and steel were studied using scanning electron microscopy with the determination of the elemental composition by energy-dispersive spectroscopy, X-ray phase analysis, and profilometry. **Results and discussion.** Ultraviolet laser treatment of the surface of TiNi alloy and steel samples leads to an increase in their hydrophilicity. In the initial state, the contact angle of wetting is ~75° for both materials, and after ultraviolet laser treatment it decreases to ~11–13° for TiNi and to ~22° for steel. The phase composition of steel does not change during laser treatment, and phases belonging to oxides are recorded on the surface of TiNi after 420 seconds of treatment. Ultraviolet laser treatment of TiNi alloy and steel leads to an increase in free surface energy, a change in the ratio of its components (a decrease in the dispersed component and a significant increase in the polar component), an increase in the oxygen content on the surface of both materials. With long laser exposure times (more than 300 seconds), microcracking occurs on the surface of the processed material, leading to an increase in roughness. The change in the surface topography (roughness) of TiNi alloy does not have a noticeable effect on the wettability of the surface of metal materials, and for steel samples, there is an insignificant tendency to reduce the contact wetting angle with increasing roughness. The degree of hydrophilicity of metal materials, characterized by the contact wetting angle, increases with an increase in the duration of laser exposure due to saturation of the surface with free oxygen and an increase in free surface energy (its polar component). Based on the studies, it can be concluded that ultraviolet laser treatment is an effective way to change the wettability of metal materials.

For citation: Sablina T.Y., Panchenko M.Yu., Zyatikov I.A., Puchikin A.V., Konovalov I.N., Panchenko Yu.N. Study of surface hydrophilicity of metallic materials modified by ultraviolet laser radiation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 218–233. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-218-233. (In Russian).

References

1. Slobodyan M.S., Markov A.B. Laser and electron-beam surface processing on TiNi shape memory alloys: a review. *Russian Physics Journal*, 2024, vol. 67 (5), pp. 565–615. DOI: 10.1007/s11182-024-03158-5.

* Corresponding author

Sablina Tatyana. Yu., Ph.D. (Engineering), Engineer
 Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian
 Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskoy Avenue,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 913 843-21-78, e-mail: sablta@mail.ru

2. Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N., Novitskaya O.S., Knyazhev E.O., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Denisov V.V. Investigation of the structural-phase state and mechanical properties of ZrCrN coatings obtained by plasma-assisted vacuum arc evaporation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24 (1), pp. 87–102. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102. (In Russian).
3. Yasenchuk Y.F., Gunther S.V., Kokorev O.V., Marchenko E.S., Gunther V., Baigonakova G.A., Dubovikov K.M. The influence of surface treatment on wettability of TiNi-based alloy. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62 (2), pp. 333–338. DOI: 10.1007/s11182-019-01716-w.
4. Erofeev M., Ripenko V., Shulepov M., Tarasenko V. Surface treatment of metals in the plasma of a nanosecond diffuse discharge at atmospheric pressure. *The European Physical Journal D: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2017, vol. 71, art. 117. DOI: 10.1140/epjd/e2017-70636-6.
5. Duan X., Yang Y., Zhang T., Zhu B., Wei G., Li H. Research progress of metal biomaterials with potential applications as cardiovascular stents and their surface treatment methods to improve biocompatibility. *Heliyon*, 2024, vol. 10 (4), p. e25515. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25515.
6. Kolobov Yu.R. Nanotechnologies for the formation of medical implants based on titanium alloys with bioactive coatings. *Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4 (11–12), pp. 758–775. DOI: 10.1134/S1995078009110020.
7. Kolobov Y.R., Manokhin S.S., Odintsova G.V., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narykova M.V. Studying the Influence of nanosecond pulsed laser action on the structure of submicrocrystalline titanium. *Technical Physics Letters*, 2021, vol. 47, pp. 721–725. DOI: 10.1134/S1063785021070245.
8. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Samokhin A.A. Material surface ablation produced by ultrashort laser pulses. *Physics-Uspekhi*, 2017, vol. 60, pp. 149–160. DOI: 10.3367/UFNe.2016.09.037974.
9. Razi S., Mollabashi M., Madanipour K. Laser processing of metallic biomaterials: an approach for surface patterning and wettability control. *The European Physical Journal Plus*, 2015, vol. 130 (11), art. 247. DOI: 10.1140/epjp/i2015-15247-5.
10. Mironov Yu.P., Meisner L.L., Lotkov A.I. The structure of titanium nickelide surface layers formed by pulsed electron-beam melting. *Technical Physics*, 2008, vol. 53 (7), pp. 934–942. DOI: 10.1134/S1063784208070189.
11. Saran R., Ginjupalli K., George S.D., Chidangil S., Unnikrishnan V.K. LASER as a tool for surface modification of dental biomaterials: a review. *Heliyon*, 2023, vol. 9 (6), p. e17457. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17457.
12. Ajmal S., Hashmi F.A., Imran I. Recent progress in development and applications of biomaterials. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62 (1), pp. 385–391. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.233.
13. Buser D., Broggini N., Wieland M., Schenk R.K., Denzer A.J., Cochran D.L., Hoffmann B., Lussi A., Steinemann S.G. Enhanced bone apposition to a chemically modified SLA titanium surface. *Journal of Dental Research*, 2004, vol. 83, pp. 529–533.
14. Yang Y., Wu Z.G., Shen B.Y., Wu M.Z., Yuan Z.S., Wang C.Y., Zhang L.C. Graded functionality obtained in NiTi shape memory alloy via a repetitive laser processing strategy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 296, p. 117177. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117177.
15. Pequegnat A., Michael A., Wang J., Lian K., Zhou Y., Khan M.I. Surface characterizations of laser modified biomedical grade NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, vol. 50, pp. 367–378. DOI: 10.1016/j.msec.2015.01.085.
16. Chenrayan V., Vaishnav V., Shahapurkar K., Dhanabal P., Kalayarasan M., Raghunath S., Mano M. The effect of fs-laser micromachining parameters on surface roughness, bio-corrosion and biocompatibility of nitinol. *Optics and Laser Technology*, 2024, vol. 170, p. 110200. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110200.
17. Liang C., Wang H., Yang J., Li B., Yang Y., Li H. Biocompatibility of the micro-patterned NiTi surface produced by femtosecond laser. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 261, pp. 337–342. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.08.011.
18. Hsiao W.-T., Chang H.-C., Nanci A., Durand R. Surface microtexturing of Ti–6Al–4V using an ultraviolet laser system. *Materials and Design*, 2016, vol. 90, pp. 891–895. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.11.039.
19. Benay U.-Y. Mechanical performance of metallic biomaterials: fundamentals and mechanisms. *Multiscale cell-biomaterials interplay in musculoskeletal tissue engineering and regenerative medicine*. Ed. by J. Miguel Oliveira, R.L. Reis, S. Pina. Academic Press, 2024, ch. 5, pp. 113–126. ISBN 978-0-323-91821-3. DOI: 10.1016/B978-0-323-91821-3.00011-6.

20. Li S., Cui Z., Zhang W., Li Y., Li L., Gong D. Biocompatibility of micro/nanostructures nitinol surface via nanosecond laser circularly scanning. *Materials Letters*, 2019, vol. 255, p. 126591. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126591.
21. Long J., Zhong M., Zhang H., Fan P. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 441, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.11.015.
22. Razi S., Mollabashi M., Madanipour K. Improving the hydrophilicity of metallic surfaces by nanosecond pulsed laser surface modification *Journal of Laser Applications*, 2015, vol. 27 (4), pp. 042006-1–042006-9. DOI: 10.2351/1.4928290.
23. Es-Souni M., Es-Souni M., Fischer-Brandies H. Assessing the biocompatibility of TiNi shape memory alloys used for medical applications. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2005, vol. 381, pp. 557–567. DOI: 10.1007/s00216-004-2888-3.
24. Shabalovskaya S.A. Physicochemical and biological aspects of nitinol as a biomaterial. *International Materials Reviews*, 2001, vol. 46, pp. 233–250. DOI: 10.1179/095066001771048745.
25. Zhang Q., Dong J., Peng M., Yang Z., Wan Y., Yao F., Zhou J., Ouyang C., Deng X., Luo H. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance. *Materials Science and Engineering: C*, 2020, vol. 111, p. 110847. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110847.
26. György E., Pérez del Pino A., Serra P., Morenza J.L. Structure formation on titanium during oxidation induced by cumulative pulsed Nd:YAG laser irradiation. *Applied Physics. A, Materials Science & Processing*, 2004, vol. 78 (5), pp. 765–770. DOI: 10.1007/s00339-002-2054-8.
27. Zhu H.-Z., Zhang H.-C., Ni X.-W., Shen Z.-H., Lu J. Fabrication of superhydrophilic surface on metallic nickel by sub-nanosecond laser-induced ablation. *AIP Advances*, 2019, vol. 9 (8), p. 085308. DOI: 10.1063/1.5111069.
28. Wang Y., Zhang M., Li K., Hu J. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy. *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 139, p. 106987. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106987.
29. Milovanović D.S., Radak B., Gaković B.M., Batani D., Momčilović M.D., Trtica M.S. Surface morphology modifications of titanium based implant induced by 40 picosecond laser pulses at 266nm. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 501 (1), pp. 89–92. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.04.047.
30. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1969, vol. 13 (8), pp. 1741–1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815.
31. Razi S., Madanipour K., Mollabashi M. Laser surface texturing of 316L stainless steel in air and water: a method for increasing hydrophilicity via direct creation of microstructures. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 237–246. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.12.022.
32. Kietzig A., Mirvakili M., Kamal S., Englezos P. Nanopatterned metallic surfaces: their wettability and impact on ice friction. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, vol. 25, pp. 1293–1303.
33. Shulepov M.A., Erofeev M.V., Ripenko V.S., Tarasenko V.F. Dynamics of titanium surface characteristics after its treatment by runaway electron preionized diffuse discharge. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 830, p. 012090. DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012090.
34. Wang R.M., Chu C.L., Hu T., Dong Y.S., Guo C., Sheng X.B., Lin P.H., Chung C.Y., Chu P.K. Surface XPS characterization of NiTi shape memory alloy after advanced oxidation processes in UV/H₂O₂ photocatalytic system. *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253 (20), pp. 8507–8512. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.04.018.
35. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 44 (12), pp. 8269–8285. DOI: 10.1143/JJAP.44.8269.
36. Miyauchi M., Nakajima A., Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T. Photoinduced surface reactions on TiO₂ and SrTiO₃ films: photocatalytic oxidation and photoinduced hydrophilicity. *Chemistry of Materials*, 2000, vol. 12, pp. 3–5. DOI: 10.1021/cm990556p.
37. Miyauchi M., Nakajima A., Watanabe T., Hashimoto K. Photocatalysis and photoinduced hydrophilicity of various metal oxide thin films. *Chemistry of Materials*, 2002, vol. 14, pp. 2812–2816. DOI: 10.1021/cm020076p.
38. Gentleman M.M., Ruud J.A. Role of hydroxyls in oxide wettability. *Langmuir*, 2010, vol. 26 (3), pp. 1408–1411. DOI: 10.1021/la903029c.
39. Rudakova A.V., Emelin A.V. Fotoindutsirovanoe izmenenie gidrofil'nosti poverkhnosti tonkikh plenok [Photoinduced change in surface hydrophilicity of thin films]. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 2021, vol. 83 (1), pp. 3–34. DOI: 10.31857/S0023291221010109.

40. Cui C.Y., Cui X.G., Ren X.D., Qi M.J., Hu J.D., Wang Y.M. Surface oxidation phenomenon and mechanism of AISI 304 stainless steel induced by Nd:YAG pulsed laser. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 305, pp. 817–824.
41. Gudimova E., Meisner L., Lotkov A., Matveeva V., Meisner S., Matveev A., Shabalina O. In vitro biocompatibility of the surface ion modified NiTi alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1783, p. 020071. DOI: 10.1063/1.4966364.
42. Poletika T.M., Girsova S.L., Meisner L.L., Schmidt E.Yu., Meisner S.N. The structure of the NiTi surface layers after the ion-plasma alloying of Ta. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1683 (1), p. 020183. DOI: 10.1063/1.4932873.
43. Semin V.O., Gudimova E.Y., Timoshevskaya S.Y., Yakovlev E.V., Markov A.B., Mesner L.L. Structure and chemical state of oxide films formed on crystalline TiNi alloy and glassy Ti-Ni-Ta-Si surface alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, vol. 32, pp. 8478–8492. DOI: 10.1007/s11665-022-07727-y.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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 оформлении 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 недопустим!**). 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 (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- 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 (следовать логике описания результатов в статье) (см. примеры в разделе «Правила оформления»). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания 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 °С) и отрицательных (–45 °С) 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. Подтвержден 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 °С). 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 проблема, 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 мето-

ды 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*

Этот 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. Этот 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 подрисовочная 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-bis>).

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 считается 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 интересов» (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. перешел 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 при-
слать на почту журнала (metal_working@mail.ru) в течение двух недель после принятия работы к печати!

*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 postgraduate 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** (**I**ntroduction, **M**ethods, **R**esults, **D**iscussion, **C**onclusion).

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

<i>Issue</i>	<i>Publication (month, date)</i>
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. Skeebea.

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;
- *Introduction*;
- *Methods*;
- *Results*;
- *Discussion*;
- 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 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 rate 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 автоматизации 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 автоматизации 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.

Вниманию 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 (*Introduction*); • Методы / Методика исследований (*Methods*); • Результаты (*Results*); • Обсуждение (*Discussion*); • 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)»

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

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.



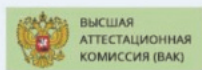
WEB OF SCIENCE



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 26 Number 4 OCTOBER – DECEMBER 2024

OBRABOTKA **OV** METALLOV

**METAL WORKING
& MATERIAL SCIENCE**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

NOVOSIBIRSK