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

Том 27, Номер 1 ЯНВАРЬ – МАРТ 2025

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

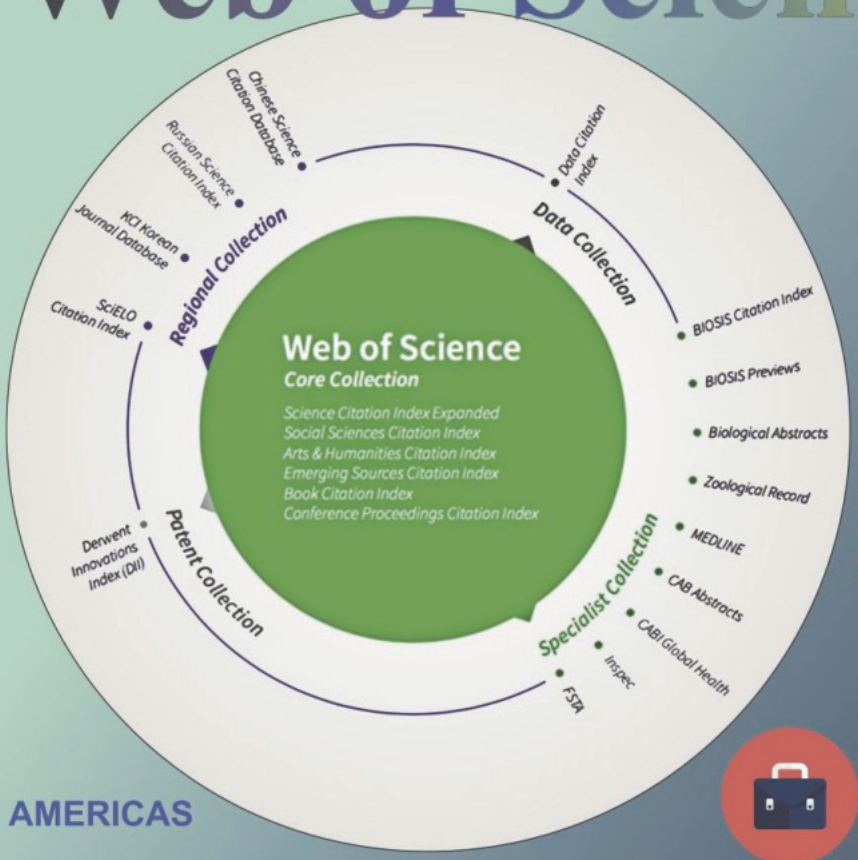
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science

Clarivate Analytics



Academic Search™ Ultimate

Applied Science & Technology Source™ Ultimate

Business Source ® Ultimate

Humanities Source™ Ultimate

Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

Расширенная версия ULTIMATE для успеха в научной работе

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

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Том 27 № 1 2025 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

Российская Федерация: **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген. директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, 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-библиографическихи наукометрических базах данных Web of Science и Scopus.

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

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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцивский Владимир Владимирович – доцент, доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

Журнал зарегистрирован 01.03.2021 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80400

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

Адрес редакции и издателя:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5.
Тел. +7 (383) 346-17-75
Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru
Цена свободная

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.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Умеров Э.Д., Скакун В.В., Джемалядинов Р.М., Егоров Ю.А. Исследование влияния масляных СОТС с улучшенными трибологическими свойствами на силы резания и шероховатость обработанных поверхностей..... 6

Маниканта Д.Э., Амбхор Н., Теллапутта Г.Р. Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке..... 20

Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Блохин В.Б., Муратов К.Р. Повышение качества изготовления изделий из жаропрочного никелевого сплава нового поколения с применением проволочно-вырезной электроэрозионной обработки..... 34

Абляз Т.Р., Осинников И.В., Шлыков Е.С., Каменских А.А., Горохов А.Ю., Кропанев Н.А., Муратов К.Р. Прогнозирование изменений поверхностного слоя в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки..... 48

Мартюшев Н.В., Козлов В.Н., Болтрушевич А.Е., Кузнецова Ю.С., Бовкун А.С. Фрезерование заготовок из инконеля 625, полученных с помощью электродуговой наплавки..... 61

Фатюхин Д.С., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Сухов А.В. Влияние угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании..... 77

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Борисов М.А., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Надеждина О.А. Разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования..... 93

Лапшин В.П., Губанова А.А., Дудинов И.О. Прогнозирование качества получаемой при резании металлов поверхности в условиях роста изношенности инструмента..... 106

Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Садыкин А.В., Мартюшев Н.В., Лобанов Д.В., Пелемешко А.К., Попков А.С. Проектирование механизма гомогенизации..... 129

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Усанова О.Ю., Рязанцева А.В., Вахрушева М.Ю., Модина М.А., Кузнецова Ю.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей из серого чугуна с помощью ионной имплантации..... 143

Абдельазиз Х., Сабер Д. Получение нанокомпозиционного материала с матрицей на основе алюминиевого сплава Al-7Si методом механического замешивания в стальную литейную форму с переменной толщиной стенок и исследование его характеристик..... 155

Дама Й.Б., Джоги Б.Ф., Паваде Р., Пал Ш., Гаиквад Й.М. Разработка и исследование композиционных материалов из акрилата с ПЭЭК для изготовления имплантатов тазобедренного сустава методом аддитивного производства (DLP 3D-печать)..... 172

Прудников А.Н., Галачиева С.В., Абсадыков Б.Н., Шарипзянова Г.Х., Цыганко Е.Н., Иванцивский В.В. Влияние деформационной термоциклической обработки и нормализации на механические свойства листовой стали 10..... 192

Бханавасе В., Джоги Б.Ф., Дама Й.Б. Исследование поведения в условиях изнашивания полифениленсульфидных (PPS) композиционных материалов, армированных стекловолокном и органической глиной..... 203

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ 218

МАТЕРИАЛЫ СОУЧЕРЕДИТЕЛЕЙ 227

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 05.03.2025. Выход в свет 17.03.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 28,5. Уч.-изд. л. 53,01. Изд. № 25. Заказ 86. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA METALLOV
METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE
ISSN 1994-6309 (Print)
ISSN 2541-819X (Online)
Volume 27 No.1 2025 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Spain:

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

Aleksandr N. 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

Umerov E.D., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Egorov Y.A. Investigation of the effect of oil-based MWFs with enhanced tribological properties on cutting forces and roughness of the processed surfaces..... 6

Manikanta J.E., Ambhore N., Thellaputta G.R. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations..... 20

Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Muratov K.R. Improvement the manufacturing quality of new generation heat-resistant nickel alloy products using wire electrical discharge machining..... 34

Ablyaz T.R., Osinnikov I.V., Shlykov E.S., Kamenskikh A.A., Gorohov A.Yu., Kropanev N.A., Muratov K.R. Prediction of changes in the surface layer during copy-piercing electrical discharge machining..... 48

Martyushev N.V., Kozlov V.N., Boltrushevich A.E., Kuznetsova Yu.S., Bovkun A.S. Milling of Inconel 625 blanks fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM)..... 61

Fatyukhin D.S., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V. Influence of the oscillating systems inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation..... 77

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Borisov M.A., Lobanov D.V., Skeeba V.Y., Nadezhdina O.A. Development of a device for studying and simulating the electrochemical grinding process..... 93

Lapshin V.P., Gubanova A.A., Dudinov I.O. Predicting machined surface quality under conditions of increasing tool wear..... 106

Podgornyj Y.I., Skeeba V.Y., Martynova T.G., Sadykin A.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Pelemeshko A.K., Popkov A.S. Designing the homogenization mechanism..... 129

MATERIAL SCIENCE

Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Vakhrusheva M.Yu., Modina M.A., Kuznetsova Yu.S. Improving the performance characteristics of grey cast iron parts via ion implantation..... 143

Abdelaziz K., Saber D. Fabrication and characterization of Al-7Si alloy matrix nanocomposite by stir casting technique using multi-wall thickness steel mold..... 155

Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R., Pal S., Gaikwad Y.M. DLP 3D printing and characterization of PEEK-acrylate composite biomaterials for hip-joint implants..... 172

Prudnikov A.N., Galachieva S.V., Absadykov B.N., Sharipzyanova G.Kh., Tsyganko E.N., Ivancivsky V.V. Effect of deformation thermocyclic treatment and normalizing on the mechanical properties of sheet Steel 10..... 192

Bhanavase V., Jogi B.F., Dama Y.B. Wear behavior study of glass fiber and organic clay reinforced poly-phenylene-sulfide (PPS) composites material..... 203

EDITORIAL MATERIALS 218

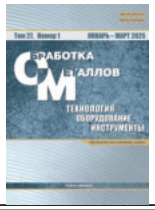
FOUNDERS MATERIALS 227

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 6–19
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-6-19

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование влияния масляных СОТС с улучшенными трибологическими свойствами на силы резания и шероховатость обработанных поверхностей

Эрвин Умеров [1, 2, a, *], ***Владимир Скакун*** [1, 2, b], ***Руслан Джемалядинов*** [1, 2, c], ***Юрий Егоров*** [2, d]

[1] Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, пер. Учебный, 8, г. Симферополь, 295015, Россия
[2] Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, пр. Академика Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0003-3477-2036, Ervin777@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0003-0656-7852, vladimir.skakun.92@list.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0003-3319-3542, rus.dzhemalyadinov@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-4990-9998, yuriyegorov@cfuv.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.01

История статьи:
Поступила: 16 октября 2024
Рецензирование: 26 октября 2024
Принята к печати: 21 ноября 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Смазочно-охлаждающие технологические средства
Коэффициент трения
Силы резания
Шероховатость

Финансирование
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-20013).

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из способов повышения эффективности процесса резания является разработка новых эффективных составов смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), которые позволят снизить силу, а также температуру резания, увеличив при этом стойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности. Одним из путей решения данной проблемы является химическая активация СОТС присадками из наноглинистых минералов с минимальной стоимостью, большие запасы которых имеются в недрах земли. В связи с этим приводится теоретическое обоснование выбора данной присадки и ее влияние на трибологические свойства СОТС. **Цель работы.** Определить влияние масляных СОТС с присадками из наноглинистых минералов на снижение силы резания, а также повышение качества обработанной поверхности при сверлении коррозионно-стойкой стали. **Методы исследования.** На операции сверления проведены экспериментальные исследования, в процессе которых осуществлялась фиксация составляющих силы резания при помощи трехкомпонентного динамометра М-30-3-6к. Целью эксперимента было определение влияния масляных СОТС, содержащих присадки из наноглинистых минералов, на составляющую силы резания, а также шероховатость обработанной поверхности. С использованием математического моделирования была получена формула для расчета коэффициента трения в процессе сверления. **Результаты работы.** В процессе проведения экспериментальных исследований получены результаты, показывающие эффективность использования масляных СОТС с присадками из наноглинистых минералов. Получены экспериментальные данные коэффициента трения, составляющей силы резания, а также шероховатости обработанной поверхности при сверлении с использованием экспериментальной СОТС, подаваемой в зону резания. Результаты исследований показали эффективность применения модифицированной СОТС по сравнению с традиционными составами. **Выводы.** Модифицированная СОТС, в состав которой входит подсолнечное масло и присадки из наноглинистых минералов, позволяет значительно снизить коэффициент трения, силу резания, а также шероховатость обработанной поверхности, что открывает дальнейшую перспективу их использования в металлообрабатывающей промышленности.

Для цитирования: Исследование влияния масляных СОТС с улучшенными трибологическими свойствами на силы резания и шероховатость обработанных поверхностей / Э.Д. Умеров, В.В. Скакун, Р.М. Джемалядинов, Ю.А. Егоров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 6–19. – DOI:10.17212/1994-6309-2025-27.1-6-19.

Введение

Развитие отечественного машиностроения – одна из приоритетных задач современного государства. В связи с этим актуально совершенствование уже существующих технологий, а также поиск новых решений, позволяющих в комплексе получить повышение качества и производительности процесса механической обработки при сохранении низкой себестоимости изготовления готового изделия.

Одним из возможных вариантов решения указанной задачи является разработка новых составов смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), сочетающих в себе высокие смазывающие и охлаждающие свойства. Требуется исследование их влияния на процесс механической обработки, что позволит открыть новые пути их эффективного применения. Одним из способов решения данной проблемы

***Адрес для переписки**
Умеров Эрвин Джеватович, к.т.н., доцент
Крымский инженерно-педагогический университет им. Февзи Якубова, пер. Учебный, 8,
295015, г. Симферополь, Россия
Тел.: +7 978 832-72-92, **e-mail:** Ervin777@yandex.ru

является применение экологически безопасных СОТС на основе растительных масел. В свою очередь, получение таких СОТС должно быть экономически обосновано и не должно приводить к большим финансовым затратам при их изготовлении.

Основным действием масляных СОТС является смазочное, обеспечивающее необходимое качество обработанной поверхности, но по охлаждающим свойствам они уступают другим средствам. В подавляющем большинстве случаев на производстве применяют водорастворимые СОТС (эмульсии), которые за счет подачи достаточно большого объема снижают температуру в зоне резания путем конвективного теплообмена, но при этом уступают масляным по смазывающим свойствам.

Анализу способов активации и совершенствования СОТС, используемых при лезвийной обработке заготовок, посвящено значительное количество научных работ, авторы которых внесли большой вклад в область исследования механизма действия СОТС в процессе резания [1–4].

Активация СОТС реализуется путем добавления в них функциональных присадок, различающихся природой и химическим строением. В состав присадок входят различные активные органические компоненты: фосфор, хлор и сера. Эти элементы образуют защитные пленки на контактных поверхностях и способствуют предотвращению молекулярного сцепления материала инструмента и заготовки. Возможно также применение графита, порошков мягких металлов (дисульфит молибдена) и высокодисперсных порошков (серпентина), относящихся к наноструктурированным присадкам. Они позволяют снизить силу трения в зоне резания за счет антифрикционных свойств, путем увеличения количества опорных площадей контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Известны также химические соединения и присадки к СОТС, которые обладают канцерогенным действием и оказывают негативное влияние на человека и окружающую среду.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что существующие методы и способы активации СОТС могут быть значительно доработаны. При этом создание новых масляных СОТС, имеющих низкую стоимость и обладающих эндотермическим (охлаждающим) эффектом с улучшенными трибологическими (смазывающими) свойствами, также остается актуальным.

Решение поставленной задачи возможно путем добавления в состав масляных СОТС присадок, представляющих собой наноглинистые минералы. По своим физико-механическим свойствам эти минералы имеют сходство с такими присадками, как дисульфид молибдена, графит и серпентин.

Основное отличие рассматриваемых присадок заключается в способности к гидрорасклиниванию структурных пакетных слоев (в процессе их гидрирования), в результате чего обеспечивается гидросмазка между слоями, которая способствует повышению трибологической эффективности масляных СОТС [5].

Таким образом, применение модифицированных СОТС с использованием в качестве модификатора трения наноглинистых минералов может положительно повлиять на процесс резания труднообрабатываемых материалов и нержавеющих сталей с присущей им низкой теплопроводностью [6, 7].

Оптимальные режимы резания [8], качество применяемых СОТС и способ их подачи [9, 10] влияют на процесс пластической деформации, приводя к снижению температуры и силы резания, а также к повышению качества обработанной поверхности и стойкости инструмента [11–15].

Следовательно, возникает необходимость в теоретических исследованиях, в проведении лабораторных и практических испытаний, направленных на разработку модифицированных СОТС с использованием в качестве модификатора трения присадок из наноглинистых минералов (ПНМ), сочетающих в себе помимо высокого смазывающего также и охлаждающее действие, необходимое при обработке труднообрабатываемых материалов и нержавеющих сталей.

***Цель исследований*:** определить влияние масляных СОТС с присадками из наноглинистых минералов на снижение силы резания и повышение качества обработанной поверхности при сверлении нержавеющей стали.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

1) обосновать выбор присадки к масляным СОТС для повышения их трибологической эффективности;

2) теоретически и экспериментально подтвердить эффективность применения в качестве модификатора трения к масляным СОТС присадок из наноглинистых минералов и их влияние на повышение трибологических свойств;

3) на основе современных положений теории резания произвести анализ влияния присадок из наноглинистых минералов, присутствующих в масляных СОТС в качестве модификатора трения, на составляющие силы резания и шероховатость обработанной поверхности.

Методика исследований

При лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов, а также нержавеющих сталей с использованием различных по составу СОТС от подаваемой в зону резания технологической среды обычно требуют как смазывающего, так и охлаждающего действия. Однако, как правило, повышение смазывающего эффекта неуклонно ведет к ухудшению охлаждающего действия таких СОТС. Это обстоятельство побуждает к поиску альтернативных решений, в результате которых полученные СОТС будут обладать высокими как смазывающими, так и охлаждающими свойствами.

На основании вышеизложенного появилась необходимость проведения экспериментальных исследований, направленных на разработку модифицированных масляных СОТС с применением ПНМ в качестве основного модифицирующего элемента, с целью уменьшения затрат энергии в процессе резания, повышения качества обработанной детали и ресурса инструмента.

Использование ПНМ имеет ряд преимуществ. Например, они являются природными ископаемыми и находятся в недрах земли в большом количестве, имея при этом минимальную стоимость. Одним из видов наноглинистых минералов является бентонит, в основе которого лежит монтмориллонит (нанодисперсный силикат в виде листовой структуры).

По своим физико-химическим свойствам указанные материалы имеют положительные особенности, такие как возможность гидрорасклинивания структурных пакетных слоев при гидрировании, что обеспечивает гидросмазку между слоями, способствуя увеличению трибологической эффективности таких СОТС. Описанное явление отличает трибологические свойства монтмориллонита относительно модификаторов трения, названных выше.

При гидрировании данной присадки, по сравнению с вышеописанными модификаторами трения, за счет расклинивающего действия поверхностно сорбированной воды трение между пакетами минерала переходит из сухого в жидкостное либо граничное трение. Гидрированные частицы минерала при попадании в контактную зону инструмента и заготовки вместе с масляными СОТС выполняют функцию «наноразмерных подшипников скольжения» [16, 17], которые позволяют снизить вероятность возникновения адгезионного износа инструмента.

Температура, достигнутая в контактной зоне инструмента и заготовки, действует на содержащиеся в масляных СОТС поверхностно сорбированные водой пакеты ПНМ, приводя, в свою очередь, к испарению влаги и обеспечивая эндотермический эффект. Одной из особенностей наноглинистых минералов является то, что в процессе испарения выделенные пары остаются в системе, а при снижении температуры выделенный пар конденсируется, возвращаясь обратно в структуру.

В процессе резания труднообрабатываемых материалов, к которым в том числе относятся и нержавеющие стали, усовершенствование трибологических характеристик СОТС особенно актуально, поскольку при обработке таких материалов доступ СОТС в контактную зону затруднен.

Рассмотрим случай, когда применяется стандартное СОТС без присадок, препятствующих адгезионному схватыванию при обработке труднообрабатываемых материалов.

Вследствие высоких удельных нагрузок, присутствующих в процессе резания и действующих на контактные поверхности инструмента, происходит вытеснение СОТС и дальнейшее схватывание стружки с инструментальной основой.

Таким образом, возникают условия для адгезионного схватывания между передней поверхностью режущего инструмента и стружкой (рис. 1, *а*).

Во втором случае масляных СОТС с присадкой графита или дисульфида молибдена, попадая в контактную зону в процессе резания (рис. 1, *б*), будет противодействовать схватыванию стружки с режущим инструментом, тем самым улучшая

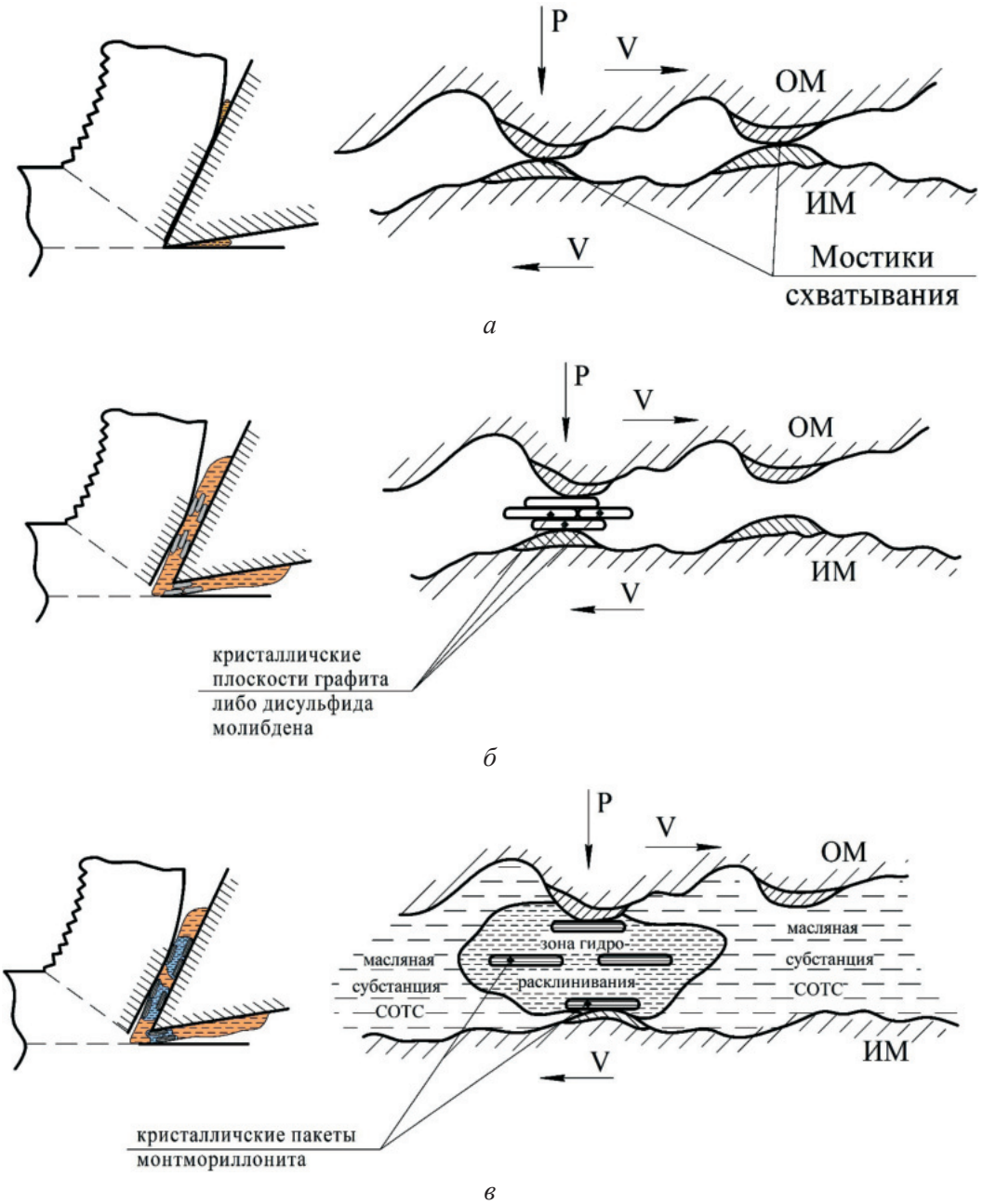


Рис. 1. Примеры реализации возможных контактных взаимодействий на передней поверхности режущего инструмента:

а – без подачи СОТС («сухое» резание); *б* – при наличии в масляном СОТС графита, который выступает в качестве присадки; *в* – при наличии в масляном СОТС присадки в виде гидрированного наноглинистого минерала; ▨ – область высокой локальной деформации; ОМ – обрабатываемый материал; *V* – линейная скорость; ИМ – инструментальный материал

Fig. 1. Examples of possible contact interactions on the rake face of a cutting tool:

а – without *MWF* feeding (“dry” cutting); *б* – with graphite in the oil-based *MWF*, acting as an additive; *в* – with an additive of a hydrogenated nanoclay mineral in the oil-based *MWF*; ▨ – the area of high local deformation; *WM* – work material; *V* – linear velocity; *TM* – tool material

условия трения в зоне резания. Это может достигаться за счет недопущения адгезионного схватывания пакетами слоев графита или дисульфида молибдена между собой.

При условии схожести кристаллических решеток графита или дисульфида молибдена и наноглинистых минералов в первом случае возможен сдвиг слоев, который происходит «всухую»,

а во втором случае создаются условия жидкостного трения при сопровождении гидрорасклинивания (рис. 1, *в*), что непосредственно влияет на трибологические свойства СОТС.

Для оценки термодинамических преобразований ПНМ, которые могут происходить в масляном СОТС при обработке материалов резанием, проведем анализ их поведения при гидратации и дегидратации. Данная присадка имеет кристаллическую решетку, состоящую из трех слоев и образующую пакеты с отрицательным зарядом, которые создают отталкивающие силы, обеспечивая при этом расклинивающий эффект [5].

Упомянутые ранее наноглинистые минералы обладают термодинамическими свойствами, и это делает возможным их использование в виде присадок к масляным СОТС.

В работе [18] приведен подробный термический анализ монтмориллонита с выделением температурного диапазона (80…220 °С), при котором проявляется эндотермический (теплопоглощающий) эффект. В начале диапазона происходит удаление адсорбционного слоя воды, после чего с поверхности минерала выводится межпакетная вода. При увеличении температуры до 600 °С происходит полное разрушение кристаллической решетки (спекание) минерала, вызванное удалением структурного слоя воды.

Известно, что в процессе резания при небольших контактных нагрузках происходит граничное трение [19], а при интенсивной пластической деформации наблюдается уже «схватывание» стружки с передней поверхностью инструмента.

Для оценки эффективности описанной выше ПНМ в составе масляных СОТС были проведены лабораторные испытания по определению эмпирического коэффициента трения в условиях, приближенных к процессу сверления.

В работах [20, 21] описаны различные методы определения коэффициента трения смазочных материалов, в которых указано, что не всегда можно произвести оценку фактического коэффициента трения с использованием определенного метода механической обработки и с присущей каждому из методов индивидуальной особенностью. В свою очередь, широко используемая методика по определению коэффициента трения на четырехшариковой машине не позволяет воспроизвести имитацию процесса трения, образованного, например, в контактной зоне режущего инструмента с заготовкой при сверлении.

Экспериментальная оценка эффективности разработанного СОТС на масляной основе с использованием в качестве модификатора трения ПНМ, а также оценка его трибологических свойств реализовывалась при использовании методики определения коэффициента трения «верчение конуса по конусу» на радиально-сверлильном станке 2К522.

Экспериментальный стенд выступал в качестве трибометра, позволяющего определять эмпирический коэффициент трения в условиях, приближенных к процессу сверления. В качестве индентора было использовано спиральное сверло из стали Р6М5 с измененной геометрией режущей кромки (рис. 2). Это обеспечивало процесс трения индентора (сверла) о коническую поверхность контртела (заготовки).

В процессе исследований на столе станка устанавливался динамометр трехкомпонентный М-30-3-6к, который позволяет регистрировать как осевую силу, так и крутящий момент. На динамометре при помощи фланца и трехкулачкового патрона закреплялась обрабатываемая заготовка из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т

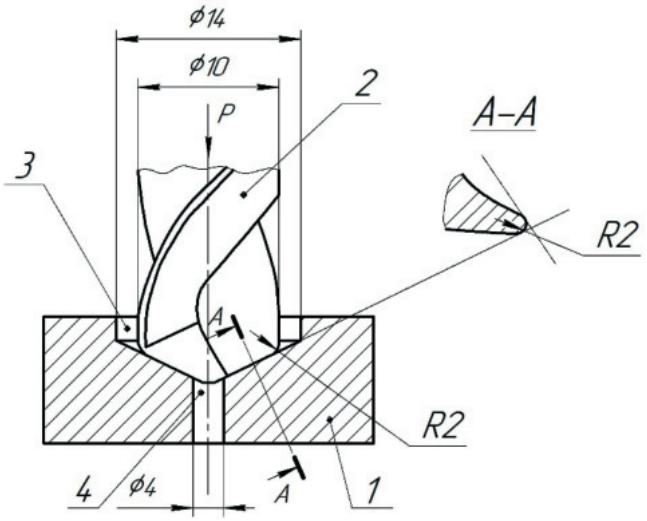


Рис. 2. Геометрия режущей кромки модифицированного сверла (индентора):

1 – контртело (заготовка); *2* – индентор (спиральное сверло); *3* – паз для подачи в зону трения СОТС; *4* – сквозное отверстие для удаления СОТС

Fig. 2. Geometry of the cutting edge of a modified drill (indenter):

1 – counterbody (workpiece); *2* – indenter (spiral drill); *3* – circular groove for supplying to the cutting zone; *4* – through-hole for removing *MWF*

с заранее полученным отверстием. В роли индентора выступало спиральное сверло диаметром D = 10 мм с углом заточки 2φ = 118°, изготовленное из быстрорежущей стали Р6М5 со скруглениями на режущей кромке (рис. 2).

Регистрация значений осевой силы и крутящего момента осуществлялась при помощи динамометра трехкомпонентного М-30-3-6к, сигнал от которого через усилитель и аналого-цифровой преобразователь передавался на персональный компьютер для дальнейшего построения графической зависимости.

На рис. 6 показан общий вид экспериментального стенда. Для предотвращения попадания СОТС на измерительное оборудование в процессе исследований применялся специальный защитный экран.

Последовательность выполнения лабораторных испытаний была следующей. На динамометре при помощи трехкулачкового патрона и фланца закреплялось контртело *4*. Индентор *1* закреплялся в шпинделе станка при помощи патрона. Далее после запуска станка с последующей подачей испытуемого модифицированного СОТС через паз *2* в контактную зону постепенно создавалась осевая нагрузка на контртело с требуемым значением P_0 и дальнейшей фиксацией момента трения. Частота вращения шпинделя составляла 500 об/мин с осевой нагрузкой на индентор P_0 = 2000 Н.

Для сравнения эффективности были использованы следующие составы СОТС: растительное масло (подсолнечное), индустриальное масло И-20А, растительное масло (подсолнечное) с ПНМ и индустриальное масло И-20А с ПНМ. Постоянная подача СОТС составляла 0,5 л/мин.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований по определению эмпирического коэффициента трения с использованием описанной выше методики.

В процессе трения вращающегося индентора (сверла) относительно неподвижного контртела оптимальным является использование не силы трения, а момента трения $M_{тр}$. В свою очередь, сила сопротивления перемещению индентора (сверла) относительно поверхности контртела

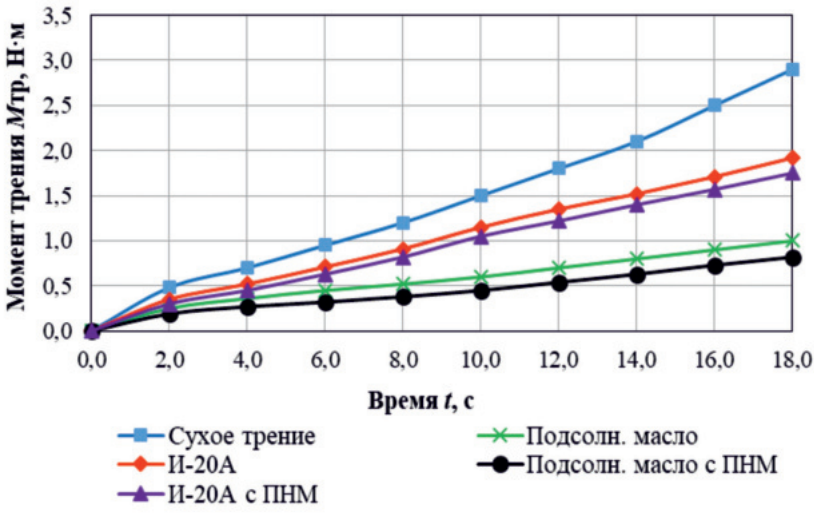


Рис. 3. Значения момента трения в среде различных СОТС

Fig. 3. Friction torque values in various *MWF* environments

является распределенной силой, которая направлена противоположно вектору скорости рассматриваемого тела.

Согласно расчетной схеме (рис. 4) сила трения $F_{тр}$ есть равнодействующая сила, которую можно определить по правилу нахождения равнодействующих параллельных распределенных сил. Определим ее величину и точку приложения, расположенную в центре линии контакта l сверла и заготовки.

Из схемы узла трения следует, что на индентор (сверло) действует пара сил $\{-F_{тр}; F_{тр}\}$ с моментом

$$M_{тр} = \frac{F_{тр}(D + d_0)}{2}, \qquad (1)$$

где D – диаметр индентора (сверла); d_0 – диаметр отверстия в контртеле, или

$$F_{тр} = \frac{2M_{тр}}{D + d_0}. \qquad (2)$$

Для рассматриваемого узла формула (2) связывает между собой момент и силу трения.

Нормальная сила P_N, действующая по контактной поверхности инструмента, есть произведение проекции нормальной силы P_N на синус угла между силами. Используя условие равновесия с учетом силы нормального давления на поверхности индентора (сверла) P_N, контактирующей с контртелом, получим

$$P_N = \frac{P_0 \sin\varphi}{2}, \qquad (3)$$

где P_0 – осевая сила, Н.

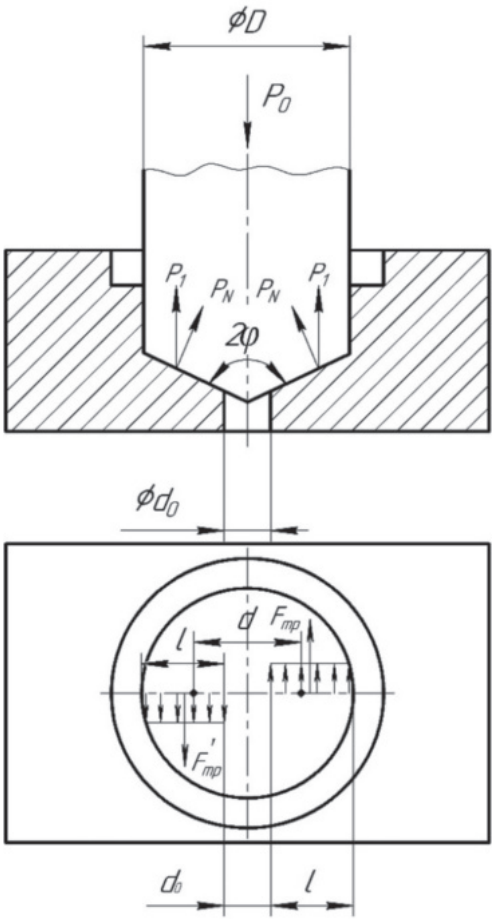


Рис. 4. Расчетная схема рассматриваемого узла трения:

2φ – угол при вершине сверла, град; $F_{тр}$ – сила трения, Н; P_0 – осевая сила, Н

Fig. 4. Design scheme of the analyzed friction pair:

2φ – drill apex angle, deg; F_{fr} – friction force, H; P_0 – axial force, H

Согласно закону Амонтона – Кулона, нормальная сила P_N связана с силой трения $F_{тр}$, которую можно определить следующим уравнением:

$$F_{тр} = \mu P_N = \frac{\mu P_0 \sin\varphi}{2}, \qquad (4)$$

где μ – эмпирический коэффициент трения.

После преобразований получим

$$\mu = \frac{4M_{тр}}{(D + d_0) \cdot P_0 \sin\varphi}. \qquad (5)$$

Далее, используя максимальные значения момента трения, а также прикладываемой осевой силы, определяется эмпирический коэффициент трения для рассматриваемого случая.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты момента трения $M_{тр}$ при постоянной осевой нагрузке P_0 = 2000 Н в среде различных составов СОТС представлены графически на рис. 5.

Проведя анализ полученных данных (рис. 5), можно сделать вывод, что максимальное значение эмпирического коэффициента трения было получено при условии «сухого» трения, без использования СОТС (μ = 0,48). Применение ПНМ в качестве модификатора СОТС позволяет снизить эмпирический коэффициент трения, где наибольший эффект от применения данной присадки проявляется на подсолнечном масле (μ = 0,11) по сравнению с СОТС на минеральной основе (μ = 0,19). Это говорит о том, что масляное СОТС на основе подсолнечного масла с ПНМ обладает улучшенной смазывающей способностью, обеспечивая тем самым граничное трение (возможно, даже жидкостное).

Таким образом, подсолнечное масло, модифицированное ПНМ, является наиболее эффективным по сравнению с подсолнечным маслом без ПНМ, минеральным маслом И-20А без ПНМ, а также минеральным И-20А, модифицированным ПНМ, что свидетельствует о высокой смазывающей и несущей способности экспериментального СОТС.

Определение значений эмпирического коэффициента трения с использованием предложенной методики позволяет дать количественную оценку трибологическим свойствам модифицированных СОТС и получить более полную ин-

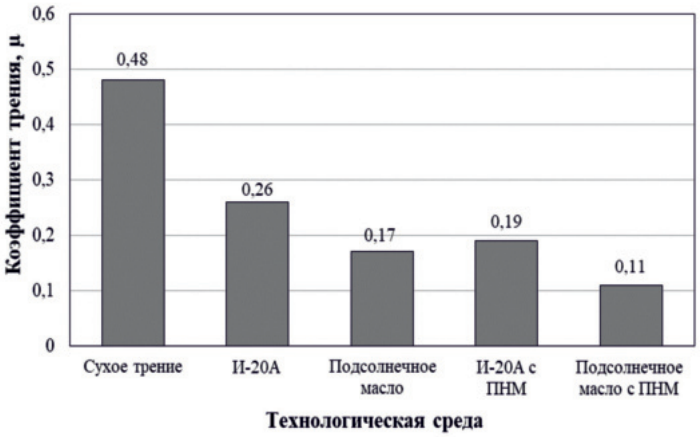


Рис. 5. Значения эмпирического коэффициента трения μ в среде различных СОТС

Fig. 5. Empirical friction coefficient (μ) values in various *MWF* environments

формацию, связанную с влиянием модификаторов – в данном случае ПНМ – на силу трения.

Следующим этапом после исследования влияния модифицированного СОТС на эмпирический коэффициент трения было определение силы резания при сверлении с использованием аналогичных СОТС. Для реализации поставленной задачи в процессе исследования был использован экспериментальный стенд (рис. 6), оснащенный трехкомпонентным динамометром М-30-3-6к, с выводом информации на персональный компьютер, позволяющий объективно оценить влияние различных СОТС на силу резания при операции сверления.

В результате экспериментальных исследований при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т были получены значения силы резания в зависимости от времени обработки и скорости резания (рис. 7, *а, б*).

Анализ полученных данных показывает, что сверление без использования СОТС приводит к возникновению высокой силы резания. Использование в качестве СОТС минерального и подсолнечного масел приводит к снижению силы резания на 10–20 %. Подача тех же видов масел, но уже с ПНМ, приводит к большему снижению сил резания (на 9–10 %) по сравнению с маслами без присадки, при этом наименьшая величина достигается при подаче подсолнечного масла с ПНМ.

Из этого следует, что ПНМ, выступающая в качестве модификатора, улучшает трибологические свойства масляного СОТС, способствуя снижению температуры в зоне резания и повышению ресурса (стойкости) режущего инструмента [22].

Представленные данные на графике (рис. 7, *б*) демонстрируют, что при скоростях резания до 20 м/мин действие СОТС оказывает значительное влияние на силу резания P_Z. Однако при увеличении скорости резания эффективность СОТС снижается, что связано с большой долей образованных сил трения по задней поверхности инструмента.

Определение шероховатости. Представляет интерес и влияние ПНМ на значение шероховатости обработанной поверхности, которая является одним из параметров качества. На шероховатость обработанной поверхности влияют различные факторы, такие как режимы резания, вид СОТС и способ его подачи в контактную зону, температура резания и др. [23, 24].

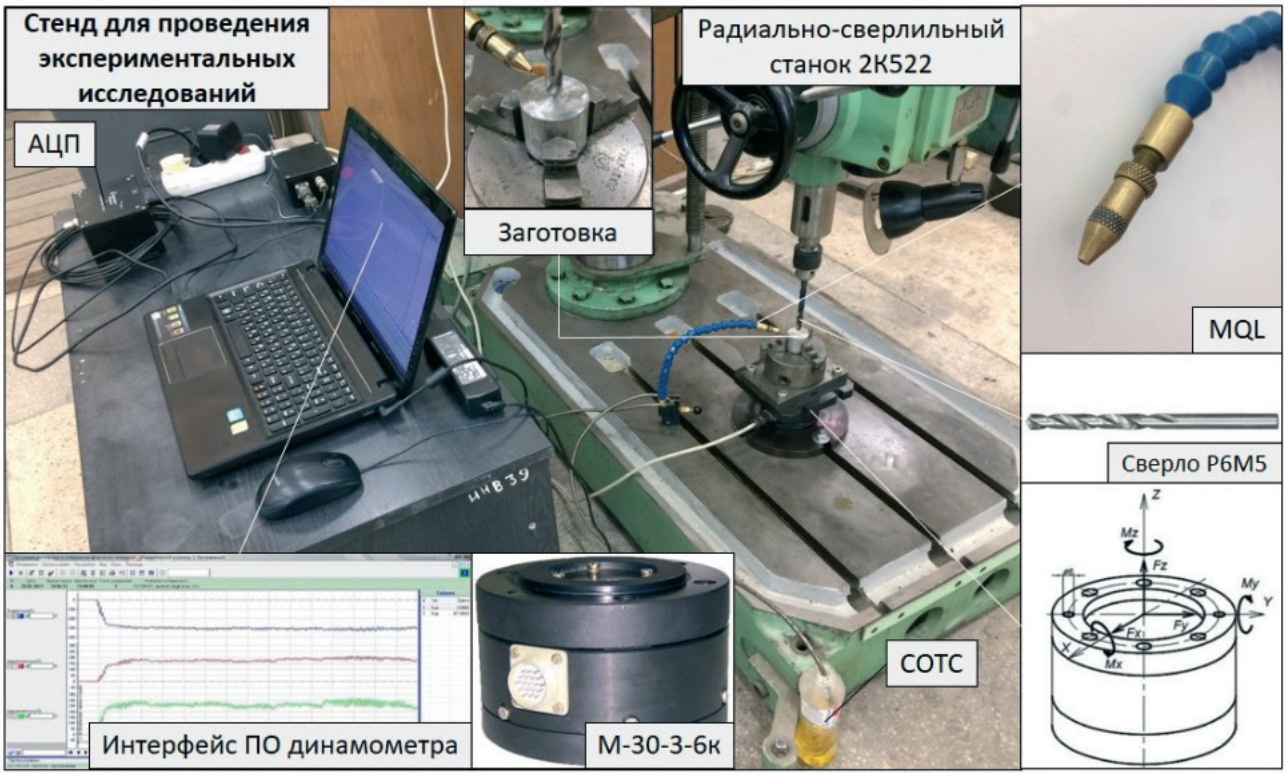
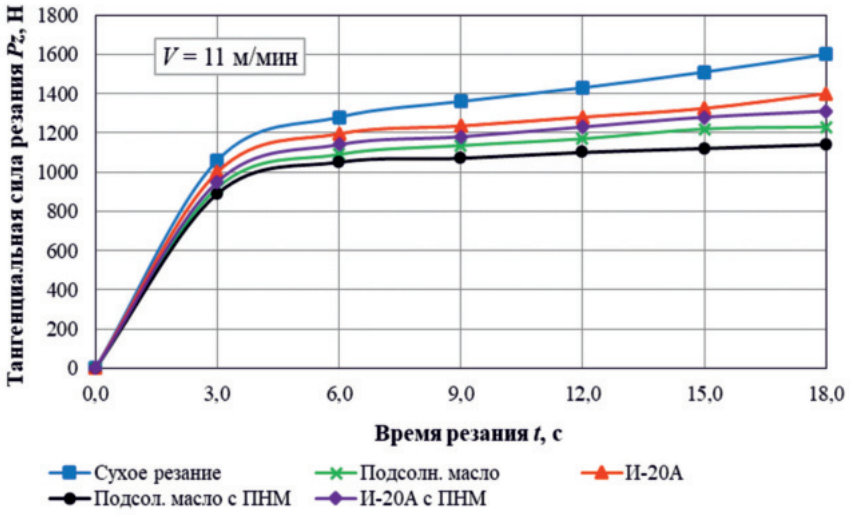
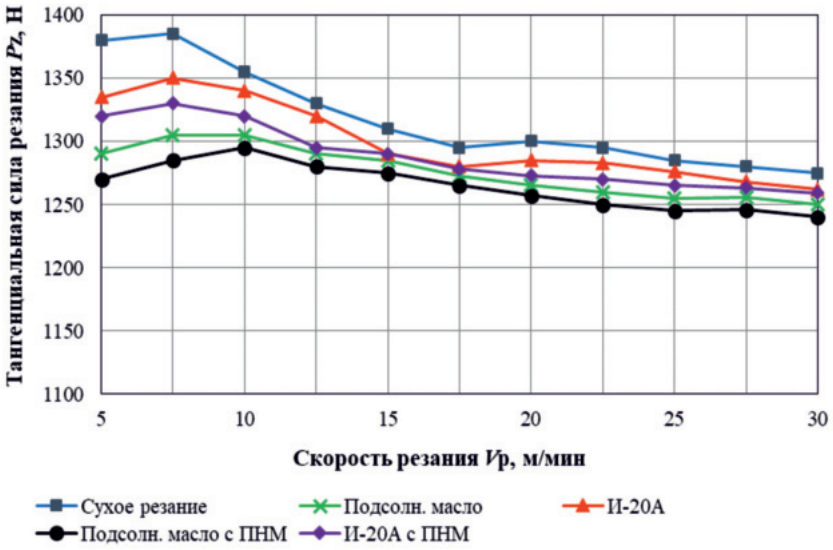


Рис. 6. Экспериментальный стенд для исследования сил резания при сверлении

Fig. 6. Experimental stand for studying cutting forces during drilling



а



б

Рис. 7. Значения тангенциальной силы резания P_Z в зависимости от времени обработки (*а*) и скорости резания (*б*) при подаче различных составов СОТС. Подача инструмента S = 0,076 мм/об. Режущий инструмент – сверло спиральное (Р6М5). D = 22 мм. Расход СОТС – 0,5 л/мин

Fig. 7. Tangential cutting force P_Z values as a function of processing time (*а*) and cutting speed (*б*) with various *MWF* compositions applied. Tool feed S = 0.076 mm/rpm. Cutting tool – Spiral drill (*HSS*). D = 22 mm. *MWF* consumption – 0.5 l/min

Применение модифицированного масляного СОТС при сверлении заготовок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием ПНМ в качестве модификатора СОТС позволяет снизить температуру резания и шероховатость обработанной поверхности.

На рис. 8 показано среднеарифметическое отклонение профиля *Ra*, отражающее шероховатость обработанной поверхности, измерение которой осуществлялось профилометром TR-200.

Выводы

Применение ПНМ при их гидрировании позволяет перейти на жидкостное межпакетное

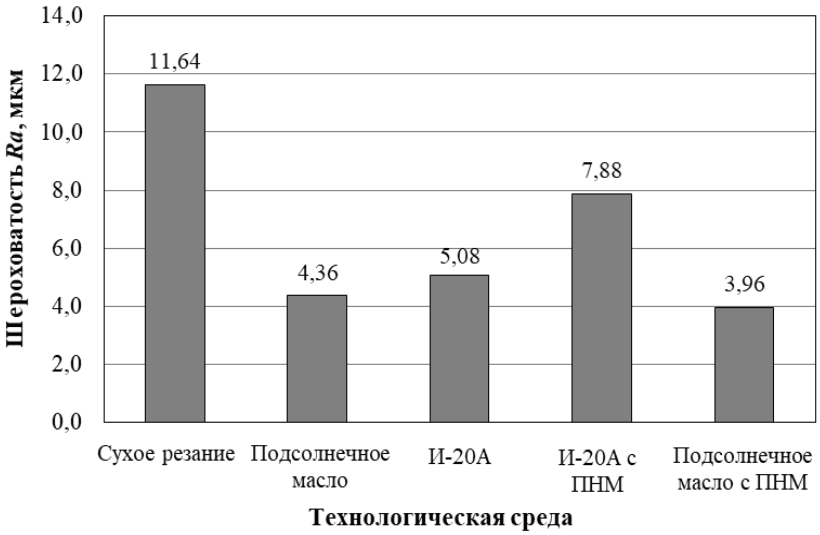


Рис. 8. Результаты среднеарифметического отклонения профиля *Ra* обработанной поверхности

Fig. 8. Results of the arithmetic mean deviation of the *Ra* profile of the processed surface

трение слоев минерала, создавая зону гидрорасклинивания и улучшая трибологические свойства масляных СОТС. Данный состав позволяет снизить температуру в зоне резания путем конвективного распределения тепла в объеме СОТС с дальнейшим его выводом из системы в окружающую среду.

Проведенные лабораторные исследования показали, что при подаче масляного СОТС с ПНМ эмпирический коэффициент трения имеет наименьшее значение (μ = 0,11) по сравнению с другими составами.

Входящая в состав масляного СОТС ПНМ также оказала положительное влияние на снижение силы резания при сверлении стали 12Х18Н10Т (на 10 %) по сравнению с подачей СОТС без присадок, а также на уменьшение шероховатости обработанной поверхности до *Ra* = 3,96 мкм.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование ПНМ в сочетании с экологически безопасными маслами открывает принципиально новые пути их эффективного использования в процессе резания, при этом основное действие ПНМ направлено на повышение смазочного, охлаждающего, а также ресурсосберегающего действия СОТС.

Список литературы

1. *Верещака А.С., Лиерат Ф., Дюбнер Л.* Анализ основных аспектов проблемы экологически безопасного резания // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 2000. – Вып. 57. – С. 29–34.

2. *Худобин Л.В., Жданов В.Ф.* О возможности активации СОЖ импульсными электрическими полями // Чистовая обработка деталей машин. – Саратов, 1980. – С. 49–53.

3. *Maddamasetty A., Revuru S., Sitaramaraju A.* Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process // Materials and Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 29 (5). – DOI: 10.1080/10426914.2014.893060.

4. Tribological studies of transmission oil dispersed with molybdenum disulfide and tungsten disulfide nanoparticles / S. Vadapalli, R.N. Thakur, J. Amitabh Kumar, B.M. Saratchandra // Journal of Tribology. – 2016. – Vol. 139 (4). – DOI: 10.1115/1.4034766.

5. *Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U.* Development of endothermic properties and improvement of tribotechnological properties in oil cutting and cooling lubricants // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1503–1507. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.669.

6. *O'Sullivan D., Cotterell M.* Machinability of austenitic stainless steel SS303 // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 124 (1–2). – P. 153–159. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00197-8.

7. Nitrogen alloyed austenitic Ni-free stainless steel for additive manufacturing / A. Antikainen, T. Jokiaho, J. Lagerbom, T. Lindroos // Powder Metallurgy. – 2024. – Vol. 67 (1–2). – DOI: 10.1177/00325899241248996.

8. Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel / Y. Su,

G. Zhao, Y. Zhao, J. Meng, C. Li // Metals. – 2020. – Vol. 10 (2). – DOI: 10.3390/met10020217.

9. *Ahmed Y.S., Paiva J.M., Veldhuis S.C.* Characterization and prediction of chip formation dynamics in machining austenitic stainless steel through supply of a high-pressure coolant // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 102. – P. 1671–1688. – DOI: 10.1007/s00170-018-03277-7.

10. *Uysal A., Demiren F., Altan E.* Investigation of surface roughness and chip forms in milling of stainless steel by MQL method // Acta Physica Polonica A. – 2016 – Vol. 129 (4). – P. 439–441. – DOI: 10.12693/APhysPolA.129.439.

11. *Muthuswamy P., Murugesan V.G.V.* Machinability analysis in high speed turning of Ti–6Al–4V alloy and investigation of wear mechanism in AlTiN PVD coated tungsten carbide tool // Engineering Research Express. – 2021. – Vol. 3 (4). – DOI: 10.1088/2631-8695/ac2e12.

12. *Khan A.A., Ali M.Y., Haque M.M.* A new approach of applying cryogenic coolant in turning AISI 304 stainless steel // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. – 2010. – Vol. 5. – P. 171–174.

13. *Muthuswamy P., Nagarajan S.K.* Experimental investigation on the effect of different micro-geometries on cutting edge and wiper edge on surface roughness and forces in face milling // Lubricants. – 2021. – Vol. 9 (10). – P. 102. – DOI: 10.3390/lubricants9100102.

14. *Shiva Pradeep N., Padmakumar M., Sarada B.N.* Experimental investigation to assess the effects of trumpet hone on tool life and surface quality in milling of AISI4140 steel // FME Transactions. – 2019. – Vol. 47 (3). – P. 437–441. – DOI: 10.5937/fmet1903437S.

15. *Isik Y.* Investigating the machinability of tool steels in turning operations // Materials and Design. – 2007. – Vol. 28 (5). – P. 1417–1424. – DOI: 10.1016/j.matdes.2006.03.025.

16. *Абдулгазис Д.У., Мевлют Ш.Т., Абдулгазис У.А.* Использование эффекта расклинивающего давления для снижения адгезионного контакта между передней поверхностью зуба сверла и стружкой // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2020. – № 2 (68). – С. 237–242.

17. *Абдулгазис Д.У., Умеров Э.Д.* О возможности формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС присадкой наноглинистых минералов листовой структуры // Известия Волгоградского технического университета. Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2016. – № 5 (184). – С. 7–11.

18. *Ящерицын П.И., Ефремов В.Д.* Основы резания металлов. – Минск: БГАТУ, 2008. – 644 с. – ISBN 978-985-6770-87-9.

19. *Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U.* Analysis of mathematical models of drilling describing surface quality and tool overload protection aspects // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224. – DOI: 10.1051/matecconf/201822401126.

20. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

21. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под общ. ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.

22. *Латышев В.Н., Шлыков А.А.* Влияние состава СОЖ на величину крутящих моментов и стойкость сверл // Технология машиностроения. – 1967. – № 4. – С. 25–29.

23. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.

24. *Pirtini M., Lazoglu I.* Forces and hole quality in drilling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 99. – P. 1271–1281. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

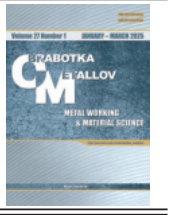
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 6–19
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-6-19

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Investigation of the effect of oil-based MWFs with enhanced tribological properties on cutting forces and roughness of the processed surfaces

Ervin Umerov [1, 2, a,*], *Vladimir Skakun* [1, 2, b], *Ruslan Dzhemalyadinov* [1, 2, c], *Yuriy Egorov* [2, d]

[1] Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, 8 Uchebnyy side st., Simferopol, 295015, Russian Federation
[2] V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Academician Vernadsky ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0003-3477-2036, Ervin777@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0003-0656-7852, vladimir.skakun.92@list.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0003-3319-3542, rus.dzhemalyadinov@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-4990-9998, yuriyegorov@cfuv.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 16 October 2024
Revised: 26 October 2024
Accepted: 21 November 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Lubricating and cooling technological means
Coefficient of friction
Cutting forces
Roughness

Funding
The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-12-20013).

ABSTRACT

Introduction. One way to enhance the efficiency of the cutting process is to develop new effective compositions of metalworking fluids (*MWFs*), which will reduce cutting force and temperature, while increasing the durability of the cutting tool and the quality of the processed surface. One approach to address this challenge is the chemical activation of *MWF* using additives based on nanoclay minerals, which are characterized by low cost and abundant reserves in-Earth. In this regard, the theoretical rationale for the selection of this additive and its impact on the tribological properties of the *MWF* is given. **The purpose of the work** is to determine the effect of oil-based additives with nanoclay minerals on reducing the cutting force, as well as improving the quality of the processed surface when drilling corrosion-resistant steel. **Research methods.** Experimental investigations were conducted during a drilling operation, in which the components of the cutting force were recorded using a three-component dynamometer *M-30-3-6k*. The aim of the experiment was to determine the effect of oil-based *MWF* containing additives from nanoclay minerals on the component of the cutting force, as well as the roughness of the processed surface. A formula for calculating the friction coefficient in the drilling process was derived using mathematical modeling. **Results and Discussion.** The experimental investigations yielded results demonstrating the effectiveness of using oil-based *MWF* with additives made from nanoclay minerals. Experimental data was obtained for the friction coefficient, cutting force component, as well as the roughness of the processed surface during drilling. These results were obtained using the experimental *MWF*, supplied to the cutting zone. The results of the study showed the effectiveness of using the modified *MWF* compared to traditional compositions. **Conclusions.** The modified *MWF*, which includes sunflower oil and nanoclay minerals as additives, significantly reduces the friction coefficient, cutting force, as well as the roughness of the processed surface, which opens up further prospects for its use in the metalworking industry.

For citation: Umerov E.D., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Egorov Y.A. Investigation of the effect of oil-based MWFs with enhanced tribological properties on cutting forces and roughness of the processed surfaces. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 6–19. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-6-19. (In Russian).

References

1. Vereshchaka A.S., Lierat F., Dyubner L. Analiz osnovnykh aspektov problemy ekologicheski bezopasnogo rezaniya [Analysis of the main aspects of the problem of environmentally safe cutting]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh* [Cutting and tool in technological systems]. Kharkiv, 2000, iss. 57, pp. 29–34.

2. Khudobin L.V., Zhdanov V.F. O vozmozhnosti aktivatsii SOZh impul'snymi elektricheskimi polyami [On the possibility of activation of coolant by pulsed electric fields]. *Chistovaya obrabotka detalei mashin* [Finishing of machine parts]. Saratov, 1980, pp. 49–53.

3. Maddamasetty A., Revuru S., Sitaramaraju A. Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, vol. 29 (5). DOI: 10.1080/10426914.2014.893060.

*** Corresponding author**
Umerov Ervin D., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov
8 Uchebnyy side st.,
295015, Simferopol, Russian Federation
Tel.: +7 978 832-72-92, **e-mail:** Ervin777@yandex.ru

4. Vadapalli S., Thakur R.N., Amitabh Kumar J., Saratchandra B.M. Tribological studies of transmission oil dispersed with molybdenum disulfide and tungsten disulfide nanoparticles. *Journal of Tribology*, 2016, vol. 139 (4). DOI: 10.1115/1.4034766.

5. Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U. Development of endothermic properties and improvement of tribotechnological properties in oil cutting and cooling lubricants. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1503–1507. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.669.

6. O'Sullivan D., Cotterell M. Machinability of austenitic stainless steel SS303. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 124 (1–2), pp. 153–159. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00197-8.

7. Antikainen A., Jokiaho T., Lagerbom J., Lindroos T. Nitrogen alloyed austenitic Ni-free stainless steel for additive manufacturing. *Powder Metallurgy*, 2024, vol. 67 (1–2). DOI: 10.1177/00325899241248996.

8. Su Y., Zhao G., Zhao Y., Meng J., Li C. Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel. *Metals*, 2020, vol. 10 (2). DOI: 10.3390/met10020217.

9. Ahmed Y.S., Paiva J.M., Veldhuis S.C. Characterization and prediction of chip formation dynamics in machining austenitic stainless steel through supply of a high-pressure coolant. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, pp. 1671–1688. DOI: 10.1007/s00170-018-03277-7.

10. Uysal A., Demiren F., Altan E. Investigation of surface roughness and chip forms in milling of stainless steel by MQL method. *Acta Physica Polonica A*, 2016, vol. 129 (4), pp. 439–441. DOI: 10.12693/APhysPolA.129.439.

11. Muthuswamy P., Murugesan V.G.V. Machinability analysis in high speed turning of Ti–6Al–4V alloy and investigation of wear mechanism in AlTiN PVD coated tungsten carbide tool. *Engineering Research Express*, 2021, vol. 3 (4). DOI: 10.1088/2631-8695/ac2e12.

12. Khan A.A., Ali M.Y., Haque M.M. A new approach of applying cryogenic coolant in turning AISI 304 stainless steel. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2010, vol. 5, pp. 171–174.

13. Muthuswamy P., Nagarajan S.K. Experimental investigation on the effect of different micro-geometries on cutting edge and wiper edge on surface rough-ness and forces in face milling. *Lubricants*, 2021, vol. 9 (10), p. 102. DOI: 10.3390/lubricants9100102.

14. Shiva Pradeep N., Padmakumar M., Sarada B.N. Experimental investigation to assess the effects of trumpet hone on tool life and surface quality in milling of AISI4140 steel. *FME Transactions*, 2019, vol. 47 (3), pp. 437–441. DOI: 10.5937/fmet1903437S.

15. Isik Y. Investigating the machinability of tool steels in turning operations. *Materials and Design*, 2007, vol. 28 (5), pp. 1417–1424. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.03.025.

16. Abdulazis D.U., Mevlut Sh.T., Abdulazis U.A. Ispol'zovanie effekta rasklinivayushchego davleniya dlya snizheniya adgezionnogo kontakta mezhdu perednei poverkhnost'yu zuba sverla i struzhkoi [Using wedging pressure effect to reduce adhesive contact between the front surface of a drill tooth and chips]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta = Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2020, no. 2 (68), pp. 237–242.

17. Abdulgazis D.U., Umerov E.D. O vozmozhnosti formirovaniya endotermicheskikh i uluchsheniya tribotekhnologicheskikh svoistv maslyanykh SOTS prisadkoi nanoglinistykh mineralov listovoi struktury [On the possibility of formation of endothermic and improvement of biotechnological properties of oil LCTM by additive of nanoclay minerals of leaf structure]. *Izvestiya Volgogradskogo tekhnicheskogo universiteta. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii = Izvestia of Volgograd State Technical University. Advanced Technology in Machine Bulding*, 2016, no. 5 (184), pp. 7–11.

18. Yashcheritsyn P.I., Efremov V.D. *Osnovy rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting]. Minsk, BGATU Publ., 2008. 644 p. ISBN 978-985-6770-87-9.

19. Abdulgazis D., Umerov E., Abdulgazis U. Analysis of mathematical models of drilling describing surface quality and tool overload protection aspects. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224. DOI: 10.1051/matecconf/201822401126.

20. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primenenie pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technological means and their application in cutting processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.

21. Entelis S.G., Berliner E.M., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva dlya obrabotki metallov rezaniem* [Lubricating and cooling technological means for metal cutting: reference]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 496 p.

22. Latyshev V.N., Shlykov A.A. Vliyanie sostava SOZh na velichinu krutyashchikh momentov i stoikost' sverl [The effect of coolant composition on the amount of torques and durability of drills]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 1967, no. 4, pp. 25–29. (In Russian).

23. GOST 25142–82. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya* [State Standard 25142–82. Surface roughness. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publ., 1982. 22 p.

24. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 99, pp. 1271–1281. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.004.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

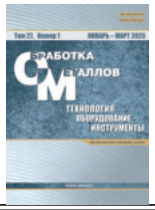
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 20–33
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке

Джаввади Эшвара Маниканта [1, a], *Нитин Амбхор* [2, b, *], *Гопала Рао Теллапутта* [3, c]

[1] Женский инженерный колледж Шри Вишну (А), Бхимаварам, Андхра-Прадеш, 534202, Индия
[2] Технологический институт Вишвакармы, Махараштра, Пуна 411037, Индия
[3] Инженерно-технологический колледж Св. Анны, Чирала, Андхра-Прадеш, 523187, Индия

[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/0000-0001-5622-4140, drtgopalarao@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.895

История статьи:
Поступила: 11 ноября 2024
Рецензирование: 25 ноября 2024
Принята к печати: 17 декабря 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Растительные масла
Наножидкости
Высокоскоростная обработка
Экологическая устойчивость

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время при токарной обработке начинают постепенно использовать смазочно-охлаждающие жидкости на основе растительных масел с наночастицами, которые обеспечивают устойчивое и высокоэффективное решение за счет улучшения смазки, охлаждения и качества поверхности. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей на основе растительных масел с наночастицами также способствует экологически безопасному подходу в обрабатывающей промышленности. Они используются в качестве альтернативы традиционным смазочно-охлаждающим жидкостям, представляющим собой опасные химические смеси, которые создают угрозу для окружающей среды и оператора. **Цель работы.** Основное внимание в настоящем исследовании уделяется использованию смазочно-охлаждающих жидкостей на основе экологически чистых растительных масел в процессе токарной обработки. В работе исследуется производительность токарной обработки стали AISI 1014 при различных комбинациях и соотношениях наночастиц. **Методы исследования.** В текущем исследовании в качестве основы использованы пять различных растительных масел, таких как кукурузное масло, кокосовое масло, подсолнечное масло, пальмовое масло и масло семян дерева ним. Для создания наножидкостей в базовую жидкость добавляют CuO, Al_2O_3, графен и порошкообразные многослойные углеродные нанотрубки. Разработаны смазочно-охлаждающие жидкости с различными концентрациями наночастиц (0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе) и исследована их производительность при обработке стали AISI 1014. **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что среди растительных масел кукурузное масло оказывает наибольшее влияние на вязкость и теплопроводность. Наночастицы графена показали многообещающие результаты в снижении силы резания, температуры и шероховатости поверхности. При использовании кукурузного масла, содержащего 0,8 масс. % наночастиц графена, наблюдается снижение силы резания до 104 Н, что на 29,8 % меньше, чем при использовании чистого кукурузного масла. При высокой концентрации (1 масс. %) наночастиц снижение нагрузки уменьшается из-за значительной агломерации наночастиц. Оптимальная концентрация наночастиц в базовой жидкости (кукурузном масле) составляет 0,8 масс. %.

Для цитирования: *Маниканта Д.Э., Амбхор Н., Теллапутта Г.Р.* Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 20–33. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33.

Введение

Смазочно-охлаждающая жидкость играет важную роль в любой операции резки металла, обеспечивая смазывание поверхности контакта между инструментом и заготовкой, а также очищая зону резания от стружки и охлаждая поверхности заготовки и режущего инструмента [1]. Однако неправильное использование смазочно-охлаждающей жидкости и неправильные методы ее утилизации могут оказывать негативное влияние как на окружающую среду, так и на здоровье человека. Целью токарной обработки является удаление материала с заготовки для получения требуемой чистоты поверхности и размеров. При точении материал постепенно удаляется путем вращения заготовки относительно одноточечного режущего инструмента [2]. Мно-

***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

гие отрасли, включая судостроение, энергетику, строительство и автомобилестроение, широко используют этот метод. В то же время высокое давление резания, трение, износ инструмента, высокие температуры на поверхности контакта инструмента и заготовки, а также значительное потребление энергии представляют собой серьезные проблемы при токарной обработке [3, 4]. Повышение стабильности и эффективности токарных операций требует снижения сил резания и потребления энергии. Использование смазочно-охлаждающей жидкости играет важную роль для устранения этих проблем и повышения качества обработки [5, 6].

Традиционные смазочно-охлаждающие жидкости, особенно полученные из минеральных масел, могут содержать опасные компоненты, включая бактерициды, смачивающие агенты, консерванты и агенты высокого давления, которые могут наносить вред как окружающей среде, так и рабочим [7]. Кроме того, переработка и утилизация использованных смазочно-охлаждающих жидкостей загрязняет окружающую среду [8]. В связи с этими проблемами растет интерес к исследованию альтернативных вариантов смазки для токарных операций [9]. Смазывающие свойства, экономическая эффективность и биоразлагаемость смазочных материалов на основе растительных масел сделали последние привлекательной альтернативой при использовании в условиях минимального количества смазки (MQL) [10]. С точки зрения КПД инструмента, стоимости, экологической безопасности и охраны труда MQL может заменить традиционное охлаждение с обильным поливом. Кроме того, используя экологически чистые смазочные материалы и методы смазки, токарная промышленность может снизить свое воздействие на окружающую среду, одновременно повышая эффективность обработки и качество продукции [11].

В настоящее время для токарной обработки в промышленности используются различные смазочно-охлаждающие жидкости. В основном это минеральные, натуральные, синтетические и полусинтетические масла. Многие исследователи использовали эти смазочно-охлаждающие жидкости и изучили производительность процесса токарной обработки.

Маниканта и др. (Manikanta et al.) [12] использовали кукурузное масло в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при точении стали SS 304. Результаты показали, что использование кукурузного масла в условиях MQL улучшает силу резания, температуру и срок службы инструмента по сравнению с обработкой без СОЖ. Влияние различных растительных масел, включая соевое, арахисовое, кукурузное, рапсовое, пальмовое, касторовое и подсолнечное, на шлифование никелевого сплава в условиях MQL было исследовано Ваном и др. (Wang et al.) [13]. Результаты показали, что кокосовое масло быстро впитывалось в инструменты и заготовки и обладало превосходным смазывающим эффектом. Касторовое масло превзошло другие шлифовальные жидкости по смазывающим свойствам и качеству поверхности заготовки. Шайх и Сидху (Shaikh and Sidhu) [14] получили благоприятные результаты при обработке стали D2 с использованием смазочно-охлаждающей жидкости на основе непищевого растительного масла. Результаты их экспериментов показали, что чистота обработанной поверхности при использовании минерального, соевого и хлопкового масла была практически одинаковой, с отклонениями менее 10 %.

Путтасвами и Рамачандра (Puttaswamy and Ramachandra) [15] изучили возможность использования масла мадуки и масла семян дерева ним в качестве буровых жидкостей при обработке стали AISI 304L в условиях MQL при давлении 2 бара. Они пришли к выводу, что по всем параметрам масло семян дерева ним и масло мадуки превзошли традиционные смазочно-охлаждающие жидкости. Ли и др. (Li et al.) [16] проводили эксперименты по шлифованию в условиях MQL с чистым растительным маслом. Их исследование показало, что пальмовое масло является наиболее подходящим базовым маслом для шлифования высокотемпературного никелевого сплава в условиях MQL с точки зрения соотношения энергии и температуры шлифования. Согласно исследованиям Бабу и др. (Babu et al.) [17] оливковое масло снижало шероховатость поверхности и износ инструмента при фрезеровании стали AISI 304 в условиях MQL. Радхика и др. (Radhika et al.) [18] использовали кунжутное масло в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при токарной обработке стали AISI 1014 и наблюдали улучшение качества обработанной поверхности и снижение силы резания.

Для шлифования в условиях MQL Го и др. (Guo et al.) [19] изучали шесть различных масел в сочетании с касторовым маслом.

Теплопроводность и смазывающие свойства растительных масел могут быть значительно увеличены за счет добавления наночастиц, что повышает эффективность обработки [20, 21]. Проводились исследования по изучению влияния добавления наночастиц в экологически чистые растительные масла на повышение эффективности резания в сценариях MQL. В своем исследовании Нам и др. (Nam et al.) [22] изучили использование наножидкости в условиях MQL при микросверлении. Их анализ показал, что использование наножидкости в условиях MQL приводит к значительному снижению крутящих моментов и осевых усилий при сверлении и увеличению количества просверленных отверстий. Кроме того, наножидкость в условиях MQL эффективно удаляет оставшуюся стружку и заусенцы, что улучшило общее качество просверленных отверстий. Шен и др. (Shen et al.) [23] диспергировали наночастицы MoS_2, алмаза и Al_2O_3 в растительном масле для изучения сил и абразивного износа инструмента при почти сухом шлифовании. Их исследование показало, что шлифование в условиях MQL с использованием алмазных наночастиц размером 100 нм в объемной концентрации 1,5 % обеспечивает наибольшее снижение усилия.

Васу и др. (Vasu et al.) в работе [24] изучили влияние MQL с наночастицами Al_2O_3 на качество поверхности Inconel 600. Согласно их данным, более высокая объемная доля наночастиц Al_2O_3 в растительном масле привела к более высокому качеству поверхности. В исследовании Ни и др. (Ni et al.) [25] графен добавляли к трем различным растительным маслам (касторовому, кукурузному и рапсовому) в разных массовых долях для улучшения нарезания резьбы в условиях MQL на алюминиевом сплаве ADC12. Ученые обнаружили, что концентрация графена 0,5 масс. % обеспечивает наименьший средний крутящий момент независимо от типа базового масла. Высококачественные резьбовые поверхности также были получены с помощью суспензии на основе 0,5 масс. % касторового масла в условиях MQL. Используя метод, состоящий из двух этапов, Чжан и др. (Zhang et al.) [26] создали наножидкости с наночастицами Al_2O_3, а затем отшлифовали заготовку из Ti-6Al-4V в условиях MQL с воздухом, охлажденным до криогенных температур. Согласно экспериментальным результатам, сочетание наножидкостей и криогенно охлажденного воздуха демонстрирует превосходное качество шлифования, превосходя как криогенное охлаждение воздухом, так и использование СОЖ с наночастицами Al_2O_3 по отдельности. Многослойные углеродные нанотрубки были добавлены в подсолнечное масло в исследовании Манойкумара и Гоша (Maojkumar and Ghosh) [27] для шлифования стали AISI 52100 в условиях малого количества охлаждающей смазки (SQCL). Их анализ показал, что разработанная жидкость улучшает качество поверхности заготовки и продлевает срок службы шлифовального круга [28].

Экологически рациональные методы являются крайне важными в секторах, производящих механическую обработку, и выбор правильных смазочно-охлаждающих жидкостей играет ключевую роль в снижении негативного воздействия на окружающую среду. В предыдущих исследованиях основное внимание уделялось использованию экологически чистых смазочно-охлаждающих жидкостей при точении, фрезеровании, сверлении, развертывании и шлифовании среди прочих операций механической обработки. Исследования растительных масел с добавлением наночастиц в различных концентрациях практически не представлены.

В данном исследовании предпринята попытка восполнить этот пробел путем использования как чистого растительного масла, так и наножидкостей на основе растительного масла при механической обработке в условиях MQL. В исследовании определено лучшее растительное масло для применения в качестве экологически чистой смазочно-охлаждающей жидкости, а также проведена оценка различных комбинаций и соотношений наночастиц с целью повышения производительности обработки. В статье представлен инновационный взгляд на составы смазочно-охлаждающих жидкостей для достижения лучших результатов механической обработки в металлорежущей промышленности с использованием комплексной методологии.

Методы

Для токарной обработки в качестве материала заготовки была выбрана сталь AISI 1014. Использовали пять базовых жидкостей: кукурузное масло, кокосовое масло, подсолнечное масло, пальмовое масло и масло семян дерева ним. Наночастицы оксида меди (CuO) (уровень чистоты 99,5 %, размерный диапазон от 30 до 50 нм) и наночастицы оксида алюминия (Al_2O_3) (уровень чистоты 99,5 %, размерный диапазон от 30 до 50 нм) поставлялись лабораторией Platonic Nanotech Private Limited (Индия). Многослойные углеродные нанотрубки (уровень чистоты 99,9 %, размерный диапазон от 5 до 20 нм, морфология: порошкообразные) и графеновые наночастицы (уровень чистоты 99,5 %, размерный диапазон от 5 до 10 нм) поставлялись той же лабораторией.

В качестве базовой жидкости использовали чистое кукурузное масло, в которое затем добавляли наночастицы для создания наносмазочно-охлаждающей жидкости. Концентрации смешанных порошкообразных частиц в базовой жидкости рассчитывали следующим образом: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. НаноСОЖ размешивали с помощью ультразвукового смесителя и магнитной мешалки. Перемешивание магнитной мешалкой длилось три часа, а ультразвуковая обработка – шесть часов. В результате была получена однородная и стабильная суспензия. Для каждого испытания брали свежий образец стабильной дисперсионной наноСОЖ и сразу же использовали, чтобы предотвратить любую потенциальную агломерацию или седиментацию.

Обработку стали AISI 1014 проводили на токарном станке в условиях MQL. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Более подробно зона токарной обработки и фотография экспериментальной установки показаны на рис. 2. На жестком держателе инструмента (PSBNR2525M-12) механически закреплена твердосплавная пластина с покрытием (SNMG120408 NSU). Кроме того, в зоне механической обработки для подачи СОЖ использовали систему MQL, которая состояла из компрессора, контроллера потока, осушителя воздуха и распылительной форсунки. В системе MQL давление подачи воздуха составляло 5 бар, а скорость потока наноСОЖ – 20 мл/мин. Распылительная форсунка была расположена непосредственно над передней поверхностью инструмента на расстоянии 4 см.

В этом исследовании изучаются параметры механической обработки, такие как сила резания, температура резания и шероховатость поверхности, при токарной обработке с использованием токарного станка Turn Master 35 Center Lathe Machine (производства KIRLOSKAR) в тумане смазочно-охлаждающих жидкостей с наночастицами различной концентрации. Среднее значение результатов регистрировали после того, как испытания были проведены не менее трех раз. Для измерения силы резания применялся динамометр Kistler (тип 9275B), в котором использованы трехкомпонентные пьезоэлектрические кристаллы. В течение регулярного пери-

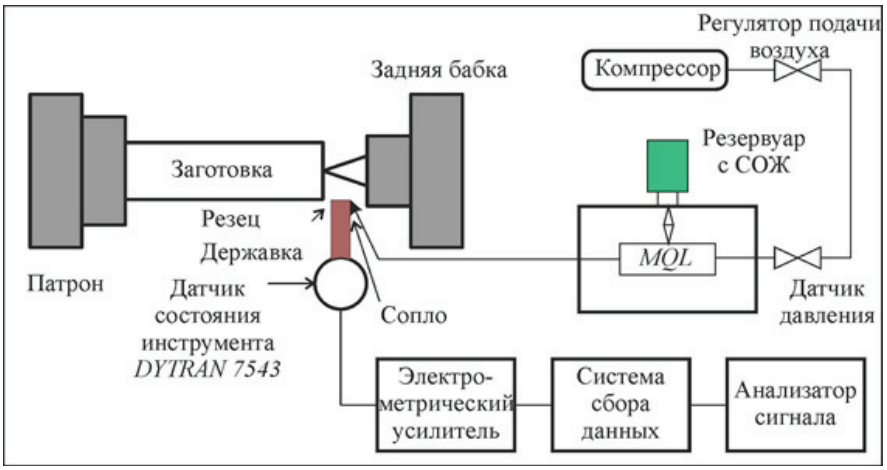


Рис. 1. Экспериментальная методология

Fig. 1. Experimental methodology

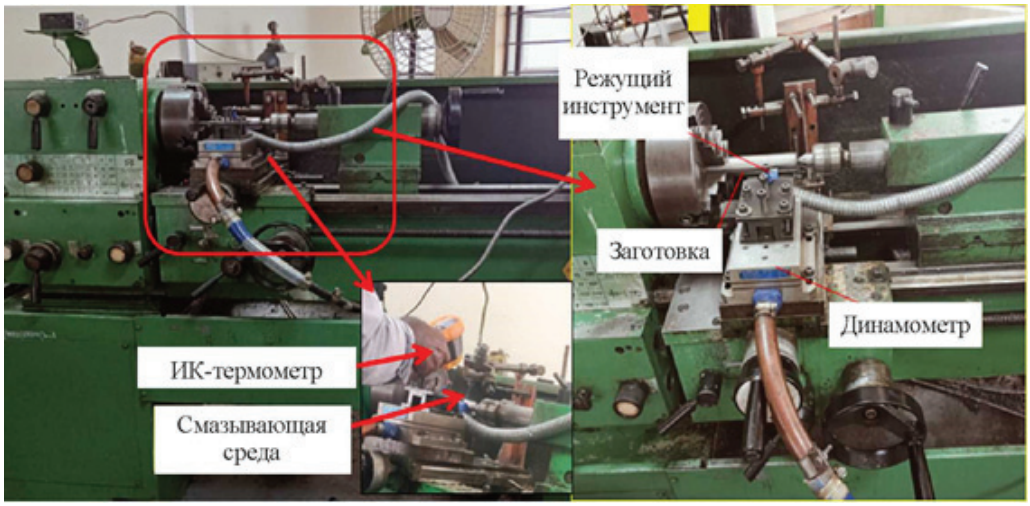


Рис. 2. Экспериментальная установка с MQL (минимальным количеством смазки)

Fig. 2. Experimental setup with *MQL*

ода были зафиксированы средние значения сил резания. Для измерения температуры резания использовали цифровой пирометр. С помощью контактного измерительного прибора Surftest SJ-210 была определена средняя шероховатость поверхности (*Ra*) заготовки. Каждое действие токарной обработки регистрировали с данными при различных условиях механической обработки.

Результаты и их обсуждение

Настоящее исследование посвящено изучению свойств различных масел, в частности их теплопроводности и вязкости при 25 °C. Эти свойства имеют решающее значение при определении пригодности масел для различных областей применения, особенно в производстве. Среди рассмотренных масел кукурузное демонстрирует самую высокую теплопроводность – 0,154 Вт/м · К. Теплопроводность относится к способности материала проводить тепло, а в контексте масел она указывает на то, насколько эффективно масло может отводить тепло. Более высокая теплопроводность подразумевает лучшие возможности теплопередачи, что делает масло пригодным для применения в областях, где критически важно эффективное рассеивание тепла. Высокая теплопроводность кукурузного масла предполагает, что оно может эффективно отводить тепло от источника, тем самым помогая поддерживать оптимальные рабочие температуры в оборудовании или тепловых системах. Теплопроводность различных растительных масел показана на рис. 3.

Вязкость характеризует сопротивление жидкости течению и зависит от таких факторов, как температура и молекулярная структура. При 25 °C вязкость кукурузного масла составляет 61 сП (сантипуаз), что указывает на его сопротивление течению при этой конкретной температуре. Вязкость различных растительных масел показана на рис. 4. Вязкость играет решающую роль в тех областях применения, где масла используют для снижения трения и износа между движущимися компонентами. Масла с более высокой вязкостью, как правило, обеспечивают лучшее смазывание и образование пленки, тем

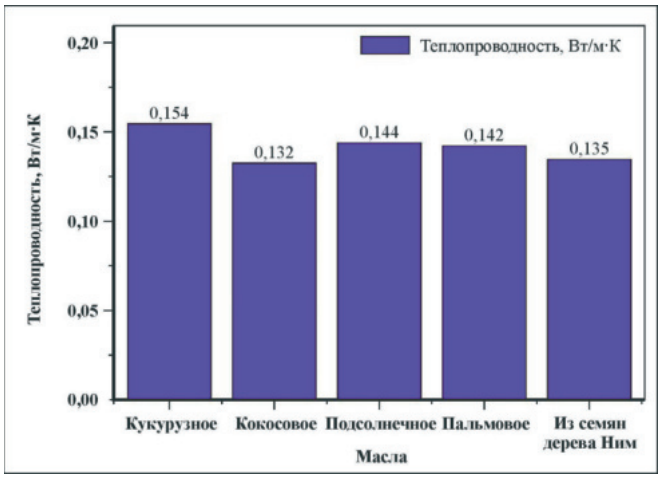


Рис. 3. Теплопроводность различных растительных масел

Fig. 3. Thermal conductivity of different vegetable oils

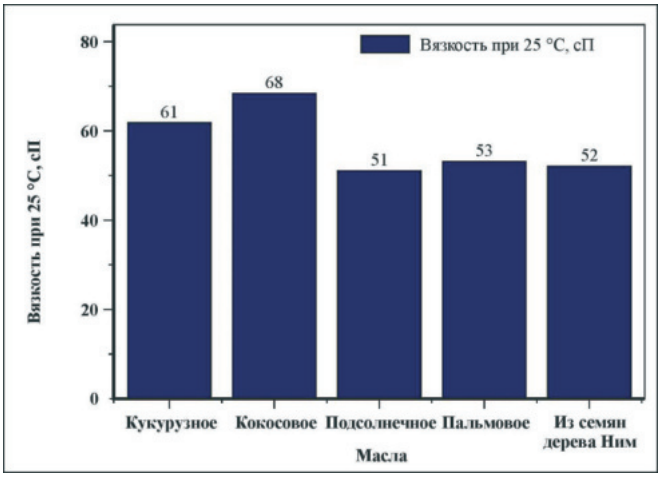


Рис. 4. Вязкость различных растительных масел

Fig. 4. Viscosity of different vegetable oils

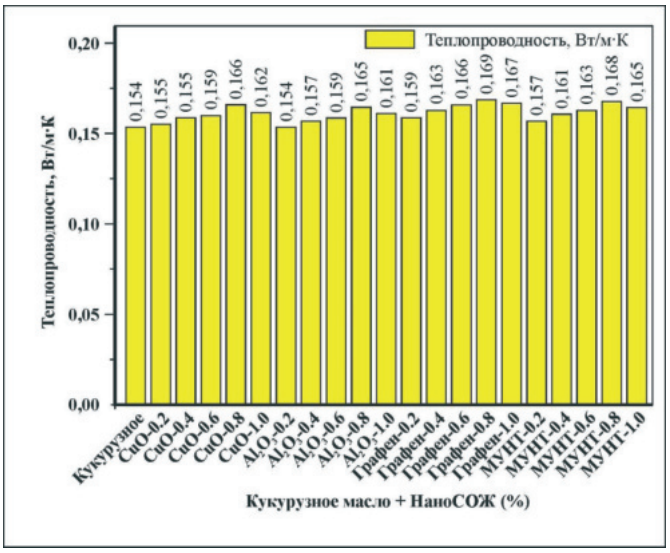


Рис. 5. Теплопроводность различных наноСОЖ

Fig. 5. Thermal conductivity of different nanofluids

самым защищая механические компоненты от повреждений. Сочетание высокой теплопроводности и умеренной вязкости делает кукурузное масло наиболее подходящим для различных промышленных применений. Его способность эффективно проводить тепло, обеспечивая при этом достаточное смазывание, может повысить производительность и долговечность машин и оборудования. В процессах обработки металла, таких как механическая обработка, где выделение тепла неизбежно, использование кукурузного масла в качестве смазочно-охлаждающей жидкости может помочь эффективно рассеивать тепло, предотвращая износ инструмента и продлевая срок его службы.

Добавление наночастиц в кукурузное масло служит эффективной стратегией минимизации трения благодаря их превосходным трибологическим и термофизическим характеристикам по сравнению с базовой жидкостью. НаноСОЖ демонстрируют исключительную эффективность, обусловленную несколькими механизмами, включая образование прокатываемой защитной пленки, а также эффекты восстановления и полировки. На рис. 5 представлена теплопроводность различных наножидкостей.

Во всех наножидкостях теплопроводность увеличивается до 0,8 % при добавлении наночастиц. Однако когда концентрация наночастиц достигает 1 %, происходит снижение теплопроводности из-за явлений седиментации или агломерации. В работе оценивали влияние различных нанопорошков (CuO, Al_2O_3, графена и многослойных углеродных нанотрубок) на свойства наножидкостей. Среди них графеновые наножидкости продемонстрировали наиболее перспективные результаты по теплопроводности. В частности, по сравнению с теплопроводностью базового кукурузного масла, равной 0,154 Вт/мК, теплопроводность графенового масла с концентрацией наночастиц 0,8 % выросла на 9,74 %, достигнув 0,169 Вт/м · К.

Примечательно, что графеновые наножидкости неизменно превосходили другие типы; за ними следовали наноСОЖ с добавлением многослойных углеродных нанотрубок, а затем – оксида меди и оксида алюминия. Эти результаты подчеркивают высокий потенциал наножидкостей на основе графена в повышении теплопроводности по сравнению с обычными базовыми жидкостями. Это связано с исключительной теплопроводностью графена, которую можно объяснить его уникальной атомной структурой и свойствами. Графен представляет собой один слой атомов углерода, расположенных в двумерной сотовой решетке, что обеспечивает эффективную передачу тепла благодаря высокой длине свободного пробега фононов и баллистическому переносу носителей тепла. Кроме того, графен обладает превосходной механической прочностью и стабильностью, предотвращая структурные деформации, которые могут препятствовать передаче тепла. Благодаря своей огромной площади поверхности он может легче взаимодействовать с соседними молекулами, что повышает эффективность теплопередачи.

На рис. 6 представлена столбчатая диаграмма, отражающая значения вязкости, наблюдаемые в наножидкостях. Для всех наножидкостей характерно заметное увеличение вязкости до 0,8 % при добавлении наночастиц. Однако как только концентрация наночастиц достигает 1 %, происходит снижение вязкости из-за явлений седиментации или агломерации. Различные нанопорошки, включая CuO, Al_2O_3, графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. Среди них графеновые наножидкости продемонстрировали наиболее благоприятные показатели вязкости. Например, по сравнению с вязкостью базового кукурузного масла, равной 61 сП, вязкость графенового масла с концентрацией наночастиц 0,8 % заметно увеличилась – на 21,3 %, достигнув 74 сП. Примечательно, что графеновые наножидкости неизменно превосходили другие типы и с точки зрения улучшения вязкости. Полученные результаты подчеркивают значительный потенциал наножидкостей на основе графена в улучшении характеристик вязкости по сравнению с обычными базовыми жидкостями. Это связано с тем, что графен обладает прочностью, сводя к минимуму структурные деформации внутри жидкости, что способствует повышению вязкости.

Высокие силы резания приводят к быстрому износу инструмента, сокращению срока его службы и увеличению частоты смены инструмента. Кроме того, они приводят к плохому качеству поверхности из-за вибраций во время обработки. Различные нанопорошки, включая CuO, Al_2O_3, графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. На рис. 7 показана измеренная сила резания при различных концентрациях наноСОЖ: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. Среди них графеновые наножидкости продемонстрировали наиболее значительное снижение силы резания. Сила резания, создаваемая при использовании базовой смазочно-охлаждающей жидкости, составила 135 Н. Однако при использовании наножидкости с концентрацией графена 0,8 масс. % сила резания снизилась до 104 Н, т. е. на 29,8 %. Это снижение силы резания можно объяснить улучшенным смазыванием. Наночастицы на поверхности металла образовали прочную смазочную пленку, что привело к лучшему рассеиванию тепла. Более высокая теплопроводность и лучшее смазывание в результате увеличения концентрации графена снизили трение и тепловыделение. Однако при использовании наноСОЖ с концентрацией графена 1 масс. % сила резания увеличилась до 108 Н по сравнению с наноСОЖ, содержащей 0,8 масс. % графена, в первую очередь из-за агломерации наночастиц, что ухудшило характеристики наножидкости.

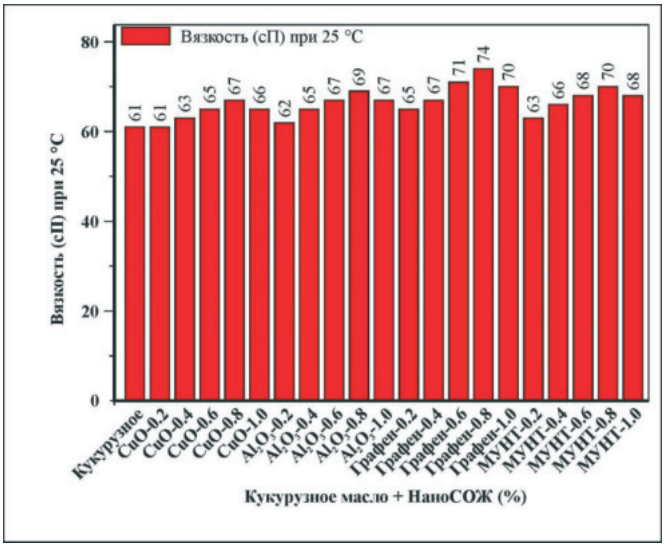


Рис. 6. Вязкость различных наноСОЖ

Fig. 6. Viscosity of different nanofluids

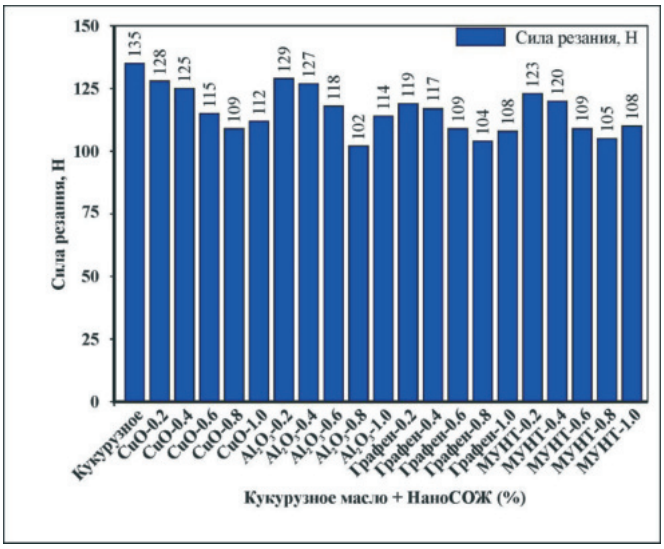


Рис. 7. Силы резания при использовании различных наноСОЖ

Fig. 7. Cutting forces when using different nanofluids

Трибологические свойства детали определяют ее способность эффективно и долгосрочно выполнять свою предполагаемую функцию в

предполагаемой области применения. Качество поверхности является одним из ключевых факторов, влияющих на трибологические характеристики. Поэтому предпочтительны низкие значения шероховатости поверхности в изготовленных изделиях. В этом исследовании изучалось влияние нескольких типов наножидкостей на среднее значение шероховатости поверхности. Различные нанопорошки, включая CuO, Al_2O_3, графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. На рис. 8 показана измеренная шероховатость поверхности при различных концентрациях наноСОЖ: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. Среди них использование графеновых наножидкостей привело к наиболее значительному снижению шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности, полученная при использовании базовой смазочно-охлаждающей жидкости, составила 1,18 мкм. Однако при использовании наножидкости с концентрацией графена 0,8 масс. % шероховатость поверхности снизилась до 0,78 мкм, т. е. на 51,3 %. Это снижение шероховатости можно объяснить улучшенным смазыванием. Наночастицы на поверхности металла образовали прочную смазочную пленку, что привело к лучшему рассеиванию тепла. Более высокая теплопроводность и лучшее смазывание в результате увеличения концентрации графена снизили трение и тепловыделение. Однако при использовании наноСОЖ с концентрацией графена 1 масс. % шероховатость увеличилась до 0,8 мкм по сравнению с наноСОЖ, содержащей 0,8 масс. % графена, в основном из-за агломерации наночастиц, что ухудшило характеристики наножидкости.

Высокие температуры резания ускоряют износ режущего инструмента, вызывая размягчение и износ материалов инструмента, что приводит к сокращению срока его службы. Высокие температуры резания могут отрицательно влиять на качество поверхности. Экстремальные температуры резки могут вызывать изменения в микроструктуре материала заготовки из-за тепла, выделяемого в процессе механической обработки. Это может влиять на такие свойства заготовки, как твердость, прочность на разрыв и остаточные напряжения. В этом исследовании изучалось, как различные типы наножидкостей влияют на среднее значение температуры резки. Различные нанопорошки, включая CuO, Al_2O_3, графен и многослойные углеродные нанотрубки, прошли оценку в наножидкостях различного состава. На рис. 9 показана измеренная температура резки при различных концентрациях наноСОЖ: 0,20 %, 0,40 %, 0,60 %, 0,80 % и 1 % по массе. Среди них использование графеновых наножидкостей привело к наиболее значительному снижению температуры резания. Температура резания, полученная при использовании

Рис. 8. Шероховатость поверхности при использовании различных наноСОЖ

Fig. 8. Surface roughness when using different nanofluids

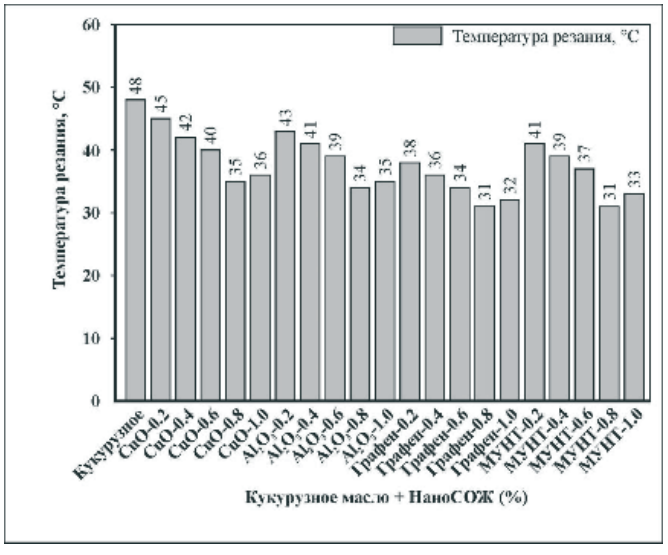


Рис. 9. Температура резания при использовании различных наноСОЖ

Fig. 9. Cutting temperature when using different nanofluids

базовой смазочно-охлаждающей жидкости, составила 48 °С. Однако при использовании наножидкости с концентрацией графена 0,8 масс. % температура резания снизилась до 31 °С, т. е. на 54,2 %. Это снижение шероховатости можно объяснить улучшенным смазыванием. Наночастицы на поверхности металла образовали прочную смазочную пленку, что привело к лучшему рассеиванию тепла. Более высокая теплопроводность и лучшее смазывание в результате увеличения концентрации графена снизили трение и тепловыделение. Однако при использовании наноСОЖ с концентрацией графена 1 масс. % температура резания увеличилась до 32 °С по сравнению с наноСОЖ, содержащей 0,8 масс. % графена, в основном из-за агломерации наночастиц, что ухудшило характеристики наножидкости.

Заключение

В данном исследовании сообщается об экспериментах по точению стали AISI 1014 в условиях MQL с использованием пяти типов растительных масел. После этого в качестве базового масла было выбрано кукурузное масло. Для создания наножидкостей в базовую жидкость добавляли CuO, Al_2O_3, графен и порошкообразные многослойные углеродные нанотрубки. Найдена идеальная концентрация и тип наночастиц. Ниже приведены краткие выводы.

• Среди рассмотренных растительных масел кукурузное масло оказывает наиболее существенное влияние на теплофизические характеристики, такие как вязкость и теплопроводность.

• Из четырех типов рассмотренных наночастиц графеновые наночастицы обеспечивают наибольшее снижение силы резания, температуры и шероховатости поверхности во время процесса токарной обработки. Экспериментально подтверждено, что при использовании кукурузного масла, содержащего 0,8 масс. % графеновых наночастиц, происходит снижение силы резания до значения 104 Н, что на 29,8 % меньше, чем в случае чистого кукурузного масла.

• Эффект наножидкости, сила резания, температура резания и шероховатость поверхности уменьшаются при заданном содержании наночастиц. Однако при высокой концентрации наночастиц (1 масс. %) снижение нагрузки уменьшается из-за значительной агломерации наночастиц. Идеальная концентрация наночастиц в принимающей жидкости (кукурузном масле) остается на уровне 0,8 масс. %.

Потенциал для будущих исследований в области экологически рациональных процессов механической обработки является значительным. Предлагаются средства для смягчения экологического ущерба по сравнению с традиционными методами смазки и смазочными материалами, а также демонстрируются многообещающие разработки в экономических и социальных аспектах. Продолжая изучение экологически чистых наноСОЖ (NCF) в рамках MQL, можно использовать несколько направлений. Дальнейшие исследования производства ди- и тригибридных наночастиц могут улучшить функциональные свойства смазочно-охлаждающих жидкостей. Это включает в себя изучение разработки путей биосинтеза растительных экстрактов для приготовления наночастиц. Оценка влияния разработанных NCF на эксплуатационные характеристики различных металлов, сплавов и композитов в процессе токарной обработки имеет большое значение.

Список литературы

1. *Ghosh S., Rao P.V.* Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Vol. 100. – P. 17–34. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.039.

2. *O'Sullivan D., Cotterell M.* Temperature measurement in single point turning // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 118 (1–3). – P. 301–308. – DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00853-6.

3. *Waydande R.P., Ghatge D.A.* Performance evaluation of cutting parameters for surface roughness & power consumption in turning of 904l stainless steel using vegetable oil based cutting fluids // Advanced Manufacturing and Materials Science: Selected Extended Papers of ICAMMS. – Springer, 2018. – P. 317–325. – DOI: 10.1007/978-3-319-76276-0_32.

4. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method / M.H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram, E. Demirbas // Journal of Cleaner Production. – 2011. – Vol. 19. – P. 2049–2056. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.

5. *Manikanta J.E., Ambhore N., Nikhare C.* Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review // Journal of

the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46. – DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

6. *Katna R., Suhaib M., Agrawal N.* Nonedible vegetable oil-based cutting fluids for machining processes – a review // Materials and Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 35 (1). – P. 1–32. – DOI: 10.1080/10426914.2019.1697446.

7. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/ health concerns / D.P. Adler, W.S. Hii, D.J. Michalek, J.W. Sutherland // Machining Science and Technology. – 2006. – Vol. 10 (1). – P. 23–58. – DOI: 10.1080/10910340500534282.

8. *Agrawal S.M., Patil N.G.* Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 steel using MQL // Procedia Manufacturing. – 2028. – Vol. 20. – P. 207–212.

9. *Sankaranarayanan R., Krolczyk G.M.* A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 67. – P. 286–313. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.002.

10. *Sharif M.N., Pervaiz S., Deiab I.* Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 89. – P. 2447–2479. – DOI: 10.1007/s00170-016-9298-5.

11. Evaluation of crude watermelon oil as lubricant in cylindrical turning of AISI 1525 steel employing Taguchi and grey relational analyses techniques / R.A. Kazeem, D.A. Fadare, I.G. Akande, T.C. Jen, S.A. Akinlabi, E.T. Akinlabi // Heliyon. – 2024. – Vol. 10 (3). – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25349.

12. Machining performance on SS304 using nontoxic, biodegradable vegetable-based cutting fluids / J.E. Manikanta, B.N. Raju, C. Prasad, B.P. Sankar // Chemical Data Collections. – 2022. – Vol. 42. – DOI: 10.1016/j.cdc.2022.100961.

13. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils / Y. Wang, C. Li, Y. Zhang, M. Yang, B. Li, D. Jia, Y. Hou, C. Mao // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 127. – P. 487–499. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.121.

14. *Shaikh J.B., Sidhu J.S.* Experimental investigation and optimization of process parameters in turning of AISI D2 steel using different lubricant // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2014. – Vol. 3 (5). – P. 189–197.

15. *Puttaswamy J.T., Ramachandra J.S.* Experimental investigation on the performance of vegetable oil based cutting fluids in drilling AISI 304L using Taguchi technique // Tribology Online. – 2018. – Vol. 13. – P. 60–66. – DOI: 10.2474/troll.13.60.

16. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil / B. Li, H. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, M. Yang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2016. – Vol. 29 (4). – P. 1084–1095.

17. End milling of AISI 304 steel using minimum quantity lubrication / M.N. Babu, V. Anandan, N. Muthukrishnan, M. Santhanakumar // Measurement. – 2019. – Vol. 138 (2). – P. 681–689. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.064.

18. *Radhika A., Rao S., Yogesh K.B.* Evaluating machining performance of AISI 1014 steel using gingelly oil as cutting fluid // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 19 (4). – P. 445–456. – DOI: 10.1080/14484846.2019.1636517.

19. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy / S. Guo, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, B. Li, M. Yang, X. Zhang, G. Liu // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 140 (3). – P. 1060–1076.

20. Nanofluids application in machining: a comprehensive review / X. Wang, Y. Song, C. Li, Y. Zhang, H.M. Ali, S. Sharma, R. Li, M. Yang, T. Gao, M. Liu, X. Cui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 131 (5). – DOI: 10.1007/s00170-022-10767-2.

21. Nanoparticle enriched cutting fluids in metal cutting operation: a review / J.E. Manikanta, R.B. Naga, B.S.S. Phanisankar, M. Rajesh, T.K. Kotteda // Recent Advances in Mechanical Engineering. – Springer, 2023. – DOI: 10.1007/978-981-19-2188-9_14.

22. *Nam J.S., Lee P.H., Lee S.W.* Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – Vol. 51. – P. 649–652.

23. *Shen B., Shih A., Tung S.C.* Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding // Tribology Transactions. – 2008. – Vol. 51 (6). – P. 730–737.

24. *Vasu V., Reddy G.P.K.* Effect of minimum quantity lubrication with Al_2O_3 nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy // Journal of Nanoengineering and Nanosystems. – 2011. – Vol. 225 (1). – P. 3–16.

25. Reinforced lubrication of vegetable oils with graphene additive in tapping ADC12 aluminum alloy / J. Ni, G. Feng, Z. Meng, T. Hong, Y. Chen, X. Zheng // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 1031–1040.

26. Experimental assessment of an environmentally friendly grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication with cryogenic air / J. Zhang, C. Li, Y. Zhang, M. Yang // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 193. – P. 236–248.

27. *Manojkumar K., Ghosh A.* Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 237. – P. 55–64.

28. *Manikanta J.E., Ambhore N. Nikhare C.* Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46. – DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

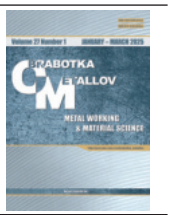
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 20–33
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations

Javvadi Eswara Manikanta [1, a], *Nitin Ambhore* [2, b, *], *Gopala Rao Thellaputta* [3, c]

[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, St. Ann's College of Engineering & Technology (Autonomous), Chirala, Andhra Pradesh, 523187, 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/0000-0001-5622-4140, drtgopalarao@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 11 November 2024
Revised: 25 November 2024
Accepted: 17 December 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Vegetable oils
Nanofluids
High-Speed machining
Environmental sustainability

ABSTRACT

Introduction. Currently, the use of vegetable oil-based cutting fluids with nanoparticles is being implemented in turning operations. These fluids provide a sustainable and high-performance solution by improving lubrication, cooling, and surface quality. The use of vegetable oil-based cutting fluids with nanoparticles also promotes an eco-friendly approach in the manufacturing industry. These fluids serve as an alternative to conventional cutting fluids, which are hazardous chemical mixtures that pose a risk to both the environment and the operator. **The purpose of the work.** The present study focuses on the use of cutting fluids based on environmentally friendly vegetable oils in the turning process. This work investigates the performance of turning *AISI 1014* steel with various nanoparticle combinations and ratios. **The methods of investigation.** In this study, five different vegetable oils — corn oil, coconut oil, sunflower oil, palm oil, and neem oil — were used as base fluid. *CuO*, Al_2O_3, graphene, and powdered multi-walled carbon nanotubes were added to the base fluid to create nanofluids. Cutting fluids were developed with varying weight concentrations of 0.20 %, 0.40 %, 0.60 %, 0.80 %, and 1 %, and its performance when machining *AISI 1014* steel was investigated. **Results and Discussion.** The results indicated that, among the vegetable oils, corn oil had the greatest effect on viscosity and thermal conductivity. Graphene nanoparticles showed promising results in reducing cutting force, temperature, and surface roughness. When using corn oil containing 0.8 wt. % graphene nanoparticles, a 104 N reduction in cutting force was observed, this is 29.8 % less than that achieved with pure corn oil. At a high concentration (1 wt. %), the reduction in load decreases due to significant agglomeration of nanoparticles. The optimal nanoparticle concentration in the base fluid (corn oil) is 0.8 wt. %.

For citation: Manikanta J.E., Ambhore N., Thellaputta G.R. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 20–33. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33. (In Russian).

References

1. Ghosh S., Rao P.V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 100, pp. 17–34. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.039.

2. O'Sullivan D., Cotterell M. Temperature measurement in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 118 (1–3), pp. 301–308. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00853-6.

3. Waydande R.P., Ghatge D.A. Performance evaluation of cutting parameters for surface roughness & power consumption in turning of 904l stainless steel using vegetable oil based cutting fluids. *Advanced Manufacturing and Materials Science: Selected Extended Papers of ICAMMS*. Springer, 2018, pp. 317–325. DOI: 10.1007/978-3-319-76276-0_32.

*** 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

4. Cetin M.H., Ozcelik B., Kuram E., Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 19, pp. 2049–2056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.

5. Manikanta J.E., Ambhore N., Nikhare C. Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, vol. 46. DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

6. Katna R., Suhaib M., Agrawal N. Nonedible vegetable oil-based cutting fluids for machining processes – a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, vol. 35 (1), pp. 1–32. DOI: 10.1080/10426914.2019.1697446.

7. Adler D.P., Hii W.S., Michalek D.J., Sutherland J.W. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. *Machining Science and Technology*, 2006, vol. 10 (1), pp. 23–58. DOI: 10.1080/10910340500534282.

8. Agrawal S.M., Patil N.G. Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 steel using MQL. *Procedia Manufacturing*, 2028, vol. 20, pp. 207–212.

9. Sankaranarayanan R., Krolczyk G.M. A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 67, pp. 286–313. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.002.

10. Sharif M.N., Pervaiz S., Deiab I. Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, pp. 2447–2479. DOI: 10.1007/s00170-016-9298-5.

11. Kazeem R.A., Fadare D.A., Akande I.G., Jen T.C., Akinlabi S.A., Akinlabi E.T. Evaluation of crude watermelon oil as lubricant in cylindrical turning of AISI 1525 steel employing Taguchi and grey relational analyses techniques. *Heliyon*, 2024, vol. 10 (3). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25349.

12. Manikanta J.E., Raju B.N., Prasad C., Sankar B.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.

13. Wang Y., Li C., Zhang Y., Yang M., Li B., Jia D., Hou Y., Mao C. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 127, pp. 487–499. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.121.

14. Shaikh J.B., Sidhu J.S. Experimental investigation and optimization of process parameters in turning of AISI D2 steel using different lubricant. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2014, vol. 3 (5), pp. 189–197.

15. Puttaswamy J.T., Ramachandra J.S. Experimental investigation on the performance of vegetable oil based cutting fluids in drilling AISI 304L using Taguchi technique. *Tribology Online*, 2018, vol. 13, pp. 60–66. DOI: 10.2474/troll.13.60.

16. Li B., Li H., Zhang Y., Wang Y., Jia D., Yang M. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29 (4), pp. 1084–1095.

17. Babu M.N., Anandan V., Muthukrishnan N., Santhanakumar M. End milling of AISI 304 steel using minimum quantity lubrication. *Measurement*, 2019, vol. 138 (2), pp. 681–689. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.064.

18. Radhika A., Rao S., Yogesh K.B. Evaluating machining performance of AISI 1014 steel using gingelly oil as cutting fluid. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 19 (4), pp. 445–456. DOI: 10.1080/14484846.2019.1636517.

19. Guo S., Li C., Zhang Y., Wang Y., Li B., Yang M., Zhang X., Liu G. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 140 (3), pp. 1060–1076.

20. Wang X., Song Y., Li C., Zhang Y., Ali H.M., Sharma S., Li R., Yang M., Gao T., Liu M., Cui X. Nanofluids application in machining: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 131 (5). DOI: 10.1007/s00170-022-10767-2.

21. Manikanta J.E., Naga R.B., Phanisankar B.S.S., Rajesh M., Kotteda T.K. Nanoparticle enriched cutting fluids in metal cutting operation: a review. *Recent Advances in Mechanical Engineering*. Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-2188-9_14.

22. Nam J.S., Lee P.H., Lee S.W. Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, vol. 51, pp. 649–652.

23. Shen B., Shih A., Tung S.C. Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding. *Tribology Transactions*, 2008, vol. 51 (6), pp. 730–737.

24. Vasu V., Reddy G.P.K. Effect of minimum quantity lubrication with Al_2O_3 nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy. *Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2011, vol. 225 (1), pp. 3–16.

25. Ni J., Feng G., Meng Z., Hong T., Chen Y., Zheng X. Reinforced lubrication of vegetable oils with graphene additive in tapping ADC12 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 1031–1040.

26. Zhang J., Li C., Zhang Y., Yang M. Experimental assessment of an environmentally friendly grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication with cryogenic air. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 193, pp. 236–248.

27. Manojkumar K., Ghosh A. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 237, pp. 55–64.

28. Manikanta J.E., Ambhore N. Nikhare C. Application of sustainable techniques in grinding process for enhanced machinability: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, vol. 46. DOI: 10.1007/s40430-024-04801-5.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

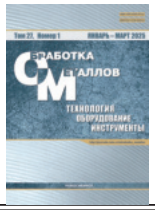
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 34–47
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-34-47

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Повышение качества изготовления изделий из жаропрочного никелевого сплава нового поколения с применением проволочно-вырезной электроэрозионной обработки

Евгений Шлыков [a, *], ***Тимур Абляз*** [b], ***Владимир Блохин*** [c], ***Карим Муратов*** [d]

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-8076-0509, Kruspert@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-6607-4692, lowrider11-13-11@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0009-0009-2693-6580, warkk98@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0001-7612-8025, Karimur_80@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:
Поступила: 12 декабря 2024
Рецензирование: 19 декабря 2024
Принята к печати: 28 декабря 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка
Шероховатость поверхности
Точность
Микротрещины
Поверхностный слой
Циклические испытания

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01224, https://rscf.ru/project/23-79-01224/.

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты экспериментального исследования по количественной и качественной оценке поверхности после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО). **Цель работы:** экспериментальное исследование с проведением анализа дефектов поверхности образцов после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. **Методы исследования.** Образцы для исследования определенной геометрии получены методом ПВЭЭО на четырех режимах. Рабочие параметры: высота образца – h, мм, время действия импульса – T_{on}, мкс, время выключения импульса – T_{off}, мкс. Выполнена оценка образцов на электронном микроскопе Hitachi S-3400N в режиме обратно рассеянных электронов при напряжении 25 кВ. Топография поверхности после электроэрозионной обработки оценивалась с помощью лазерного сканирующего микроскопа (ЛКСМ) LextOLS4000. Циклические испытания проводились на универсальной испытательной машине Biss-00-100 с частотой испытаний 20 Гц в симметричном цикле ($R = -1$). **Результаты и обсуждение.** Установлено, что при ПВЭЭО величина дефектного белого слоя постоянна и составляет 10 мкм независимо от режима обработки. Проанализирован показатель качества поверхности – шероховатости по *Ra*. Установлено, что среднее значение шероховатости по параметру *Ra* составляет 1,62 мкм при обработке образца высотой 10 мм. При увеличении высоты значение шероховатости поверхности достигает 2,6 мкм на минимальном режиме и 3,4 мкм – на максимальном. Установлено, что с увеличением высоты заготовки возрастает количество микротрещин на поверхности изделия, связанное с интенсификацией взаимодействия единичных импульсов с обрабатываемой поверхностью. В результате исследования установлено, что при амплитуде нагружения 400 МПа достигается среднее значение числа циклов, которое составляет 1,50E+05 циклов. Отмечено уменьшение количества циклов при увеличении амплитуды циклов нагружения.

Для цитирования: Повышение качества изготовления изделий из жаропрочного никелевого сплава нового поколения с применением проволочно-вырезной электроэрозионной обработки / Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, К.Р. Муратов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 34–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-34-47.

Введение

В современной промышленности происходит постоянное ужесточение требований к показателям качества изделий. Внедрение сплавов нового поколения приводит к повышению физико-механических свойств изделий. Так, внедрение в производство гранулируемого жаропрочного никелевого сплава ВВ751П привело к повышению устойчивости изделий авиации в среде высоких температур без потери их механических свойств. Изделия из жаропрочного сплава ВВ751П имеют продленный эксплуатационный срок службы и повышенные характеристики циклической долговечности [1–3].

Для изготовления изделий в современном авиадвигателестроении применяется преимущественно механическая обработка. Внедрение новых материалов приводит к значительному

***Адрес для переписки**
Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр., 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел.: +7 961 759-88-49, **e-mail:** Kruspert@mail.ru

усложнению технологического процесса серийного изготовления. Обработка жаропрочных материалов механическими методами имеет ряд технологических и экономических недостатков. При механической обработке изделий из жаропрочных сплавов из-за их высокой твердости происходит образование проточин на резце, что приводит к снижению стойкости инструмента и снижению точности обработки. Другой проблемой в процессе обработки резанием является упрочнение и низкая теплопроводность обрабатываемого материала. В процессе резания при обработке жаропрочных материалов выделяется значительное количество теплоты, что приводит к интенсификации и локализации термического воздействия на режущую кромку резца и к его износу [4, 5].

Альтернативным методом изготовления изделий из жаропрочных сплавов нового поколения является проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) [6–10]. ПВЭЭО основана на разрушении материала с поверхности заготовки под действием электрических импульсов, возникающих между электродом-инструментом (ЭИ) и электродом-деталью (ЭД), которые выделяют тепло. Такая обработка не зависит от механической прочности, твердости, вязкости и хрупкости материала, и полностью отсутствует механическое воздействие на обрабатываемую поверхность [11–14].

При внедрении ПВЭЭО в производство необходимо исследовать вопрос обеспечения качества поверхности в процессе обработки. В процессе ПВЭЭО кратковременные единичные импульсы приводят к интенсивному локальному термическому и химическому влиянию на обрабатываемую поверхность заготовки. В результате образовывается наружный поверхностный слой, отличающийся от основного материала по физико-механическим свойствам. Этот слой обладает иными значениями твердости, нежели основной материал, на нем могут присутствовать трещины и другие поверхностные дефекты. Энергия каждого отдельно взятого импульса и время его воздействия на площадь заготовки определяют, в свою очередь, значение величины измененного слоя.

Помимо поверхностных дефектов в данном слое активно интенсифицируются остаточные напряжения. Интенсивное термическое воздействие способствует возникновению в поверхностном слое заготовки остаточных напряжений. Величина и направление этих напряжений напрямую зависят от режимов обработки, а также от физических и химических свойств материала и поверхностного слоя [15–18].

Для минимизации величины измененного поверхностного слоя требуется исследование влияния режимов обработки на его формирование [19–21]. Режимы обработки влияют на показатель качества поверхности – шероховатости по *Ra*.

Можно наблюдать неоднородности рельефа поверхности после ПВЭЭО, сформированной наложением большого количества лунок, которые образованы воздействием единичных импульсов на поверхность заготовки. Микрорельеф поверхности после ПВЭЭО отличается от поверхности, полученной лезвийным инструментом.

Актуальной задачей является обеспечение качества поверхности при обработке жаропрочных никелевых сплавов нового поколения проволочно-вырезной электроэрозионной обработкой.

Целью работы является экспериментальное исследование с проведением качественного и количественного анализа дефектов на поверхности образцов после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.

Задачи

1. Проанализировать величину дефектного (белого) слоя образцов, изготовленных в рамках исследования из жаропрочного сплава ВВ751П.
2. Проанализировать показатель качества поверхности изготовленных образцов – шероховатость по *Ra*, мкм.
3. Провести исследование поверхности на наличие микротрещин и структурных дефектов с применением лазерного сканирующего микроскопа и оценить температурное воздействие при формировании микрорельефа поверхности.
4. Провести циклические испытания образцов из жаропрочного сплава ВВ751П после ПВЭЭО.

Методика исследований

Эксперименты проводились на базе ЦКП «Центр аддитивных технологий» кафедры ИТМ

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». В ходе экспериментов были изготовлены образцы, представленные на рис. 1. Процесс проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО) осуществлялся с использованием станка Electronica EcoCut производства компании Electronica Machine Tools (Пуна, Индия). В процессе исследования в качестве электрода-инструмента применялась проволока BercoCut производства компании Berkenhoff GmbH (Херборн, Германия) диаметром 0,25 мм. Для обеспечения процесса обработки использовалась дистиллированная вода в качестве рабочей среды.

Обработка образцов выполнялась на минимальном и максимальном режимах. Каждый эксперимент повторялся три раза. Такая повторяемость позволяет исключить появление случайных погрешностей. В качестве изменяемых режимов обработки были выбраны время включения импульса T_{on}, мкс, время выключения импульса T_{off}, мкс, и высота образца. Режимы ПВЭЭО представлены в табл. 1.

Шероховатость обработанной поверхности после ЭЭО по параметру *Ra* измерялась на профилометре Mahr Perthometer S2 (MahrGmbH, Геттинген, Германия) при базовой длине трассировки 0,8 мм.

С применением лазерного сканирующего микроскопа (ЛКСМ) LextOLS4000 (Olympus Corporation, Токио, Япония) по трехмерной модели изображения получена топография поверхности после электроэрозионной обработки. Модель поверхности получена в программном модуле 3D Roughness Reconstruction (Olympus Corporation, Токио, Япония). Трехмерная поверхность получена оптическими срезами в результате сканирования *X-Y-Z* определенных участков поверхности. Сканирование проводилось при увеличении ×200 и ×1000 и шаге ска-

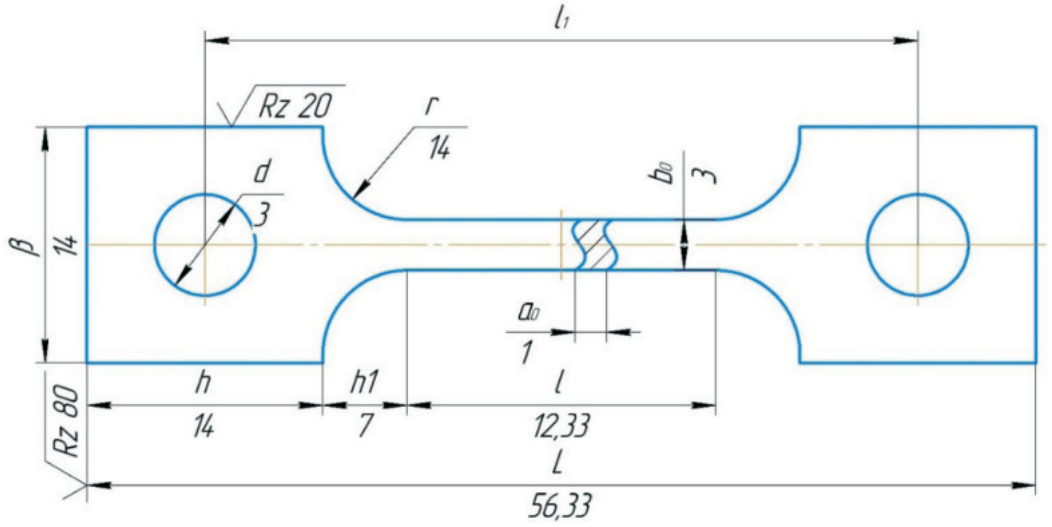


Рис. 1. Геометрия образца

Fig. 1. Specimen geometry

Таблица 1

Table 1

Режимы ПВЭЭО (проволочно-вырезная электроэрозионная обработка)

WEDM modes

№	T_{on}, мкс	*h*, мм	T_{off}, мкс
1	21	10	60
2	30		
3	21	15	
4	30		

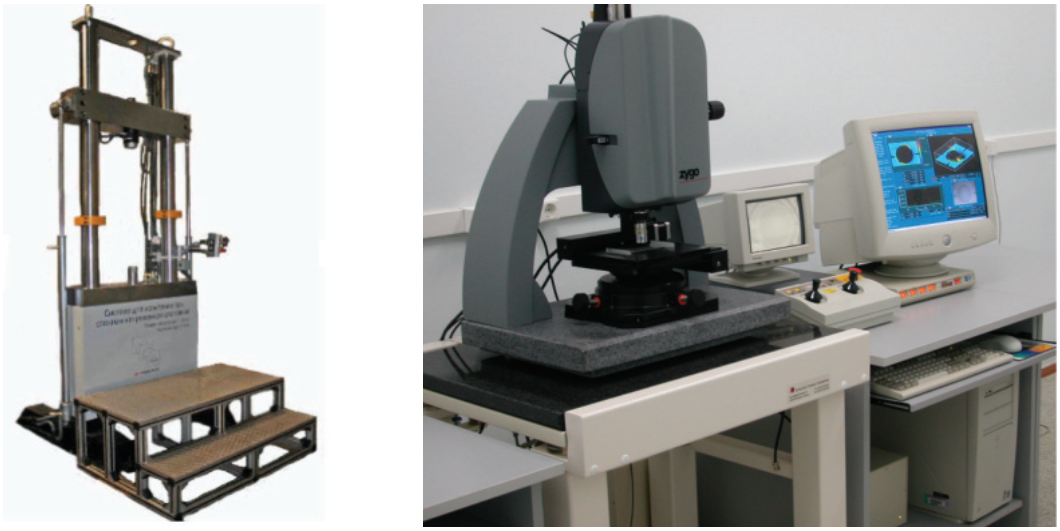
нирования по оси *Z*, равном 2 мкм. В качестве источника света при сканировании применялся полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм. Для визуальной оценки результатов обработки использовали сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N в режиме обратно рассеянных электронов при напряжении 25 кВ.

Циклические испытания проводились на универсальной испытательной машине Biss-00-100 (рис. 2, *а*) с частотой испытаний 20 Гц в симметричном цикле ($R = -1$). Процесс контроля усталостных испытаний материалов осуществлялся методом мягкого нагружения, т. е. с плавным и контролируемым увеличением приложенных напряжений. Критериями остановки испытания служили три основных фактора, тщательно отслеживаемые специализированной измерительной аппаратурой. Испытание прекращалось при полном разрушении образца – это наиболее очевидный признак достижения предела выносливости материала. Испытание прерывалось при достижении заранее определенного числа циклов нагружения, кратного 100 000. Остановка испытания происходила при увеличении размаха деформаций более чем на 20 % от начальной величины. Этот параметр отражает накопление пластической деформации в материале. Превышение допустимого порога в 20 % сигнализирует о значительном снижении несущей способности образца и указывает на близость к разрушению. Важно учитывать, что этот порог может варьироваться в зависимости от типа материала и условий испытания.

Для исследования влияния процесса поверхностной ПВЭЭО на усталостные характеристики образцы снимались с испытаний после 100 тысяч циклов. Проводилось оптическое сканирование поверхности с помощью оптического микроскопа – профилометра NewView 5010 (рис. 2, *б*). Этот прибор позволяет создать цифровую модель рельефа поверхности и провести как качественный, так и количественный анализ изменений, которые произошли на поверхности материала в процессе испытаний.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования были проанализированы образцы жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, полученные методом ПВЭЭО на минимальном и максимальном режимах. Поверхностный слой образцов качественно и количественно



а *б*

Рис. 2. Оборудование для исследования влияния циклических испытаний на деформацию поверхности:

а – сервогидравлическая универсальная испытательная машина Biss-00-100; *б* – интерферометр-профилометр NewView 5010

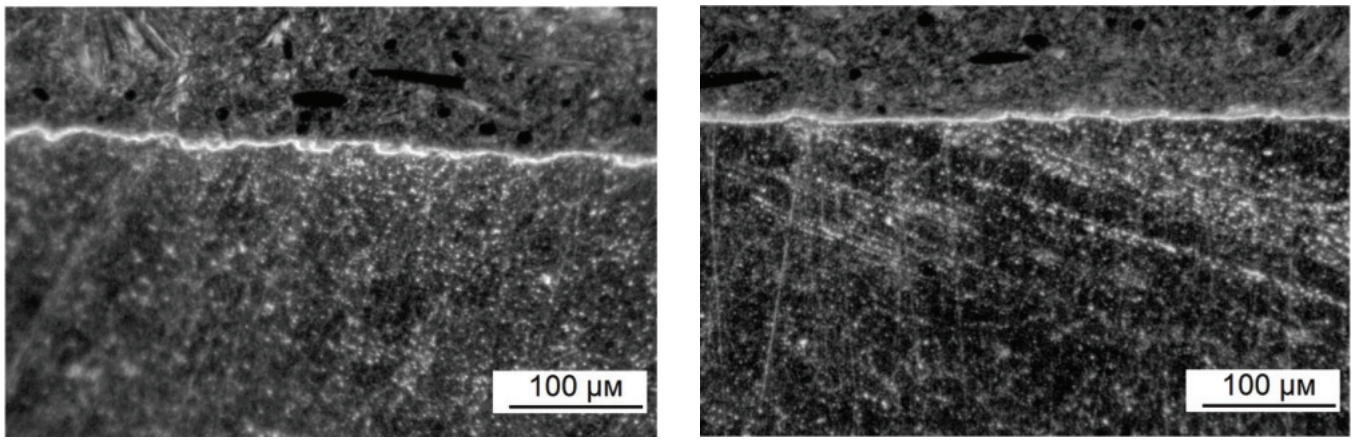
Fig. 2. Equipment for studying the effect of cyclic tests on surface deformation:

а – servo-hydraulic universal testing machine *Biss-00-100*; *б* – interferometer-profilometer *NewView 5010*

оценивался с помощью оптического микроскопа Olympus GX51 при увеличении ×200 (рис. 3).

Установлено, что при ПВЭЭО величина дефектного белого слоя остается стабильной на обоих режимах и составляет 10 мкм. Изменение параметров обработки в данном диапазоне не оказывает значительного влияния на глубину образования дефектного слоя.

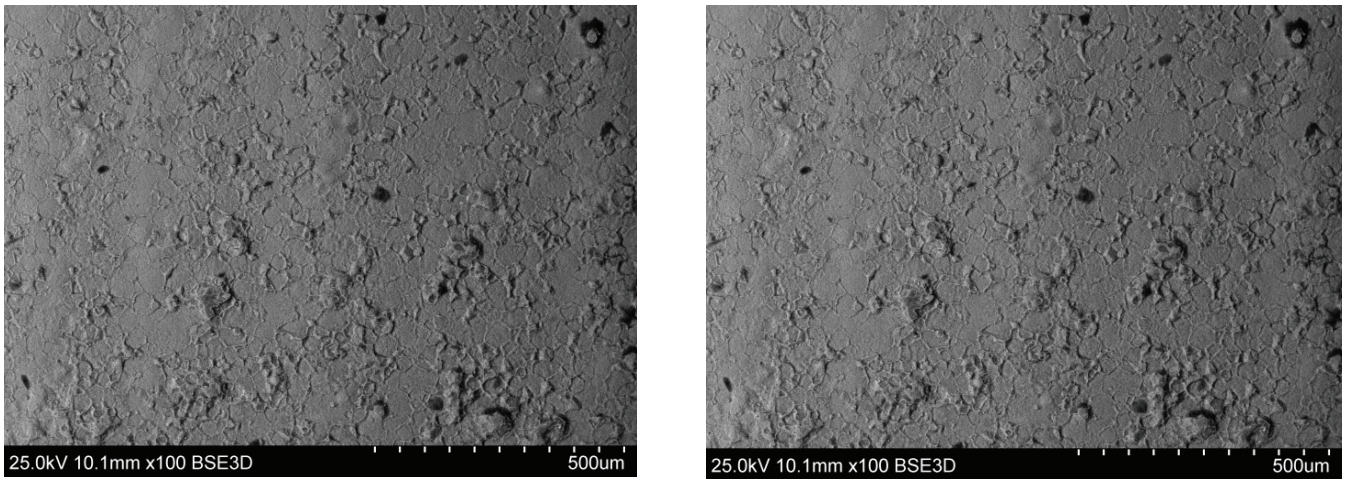
Поверхность образца, выполненного из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, подвергнутого ПВЭЭО на минимальном режиме № 1, показана на рис. 4. При исследовании образца методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) не обнаружено поверхностных дефектов в виде пор и трещин. Во время процесса ПВЭЭО происходят искровые разряды и наблюдается выброс микрообъема расплавленного металла из образца, что приводит к образованию микрократера. Выброшенный расплавленный металл быстро затвердевает, формируя характерный валик по периметру кратера. На рис. 4, *а* и *б* отсутствуют ярко выраженные зоны расплава



а *б*

Рис. 3. Структура поверхностного слоя образцов ВВ751П после ПВЭЭО:
а – на минимальном режиме; *б* – на максимальном режиме

Fig. 3. Structure of the surface layer of *VV751P* samples after *WEDM*:
а – in minimum mode; *б* – in maximum mode



а *б*

Рис. 4. Поверхность образца, выполненного из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, после электроэрозионной проволочной обработки по режиму № 1 (получено при помощи СЭМ):
а – увеличение ×100; *б* – увеличение ×1000

Fig. 4. Surface of the specimen made of heat-resistant nickel alloy *VV751P* after *WEDM* according to mode No. 1, obtained using *SEM*:
а – 100× magnification; *б* – 1,000× magnification

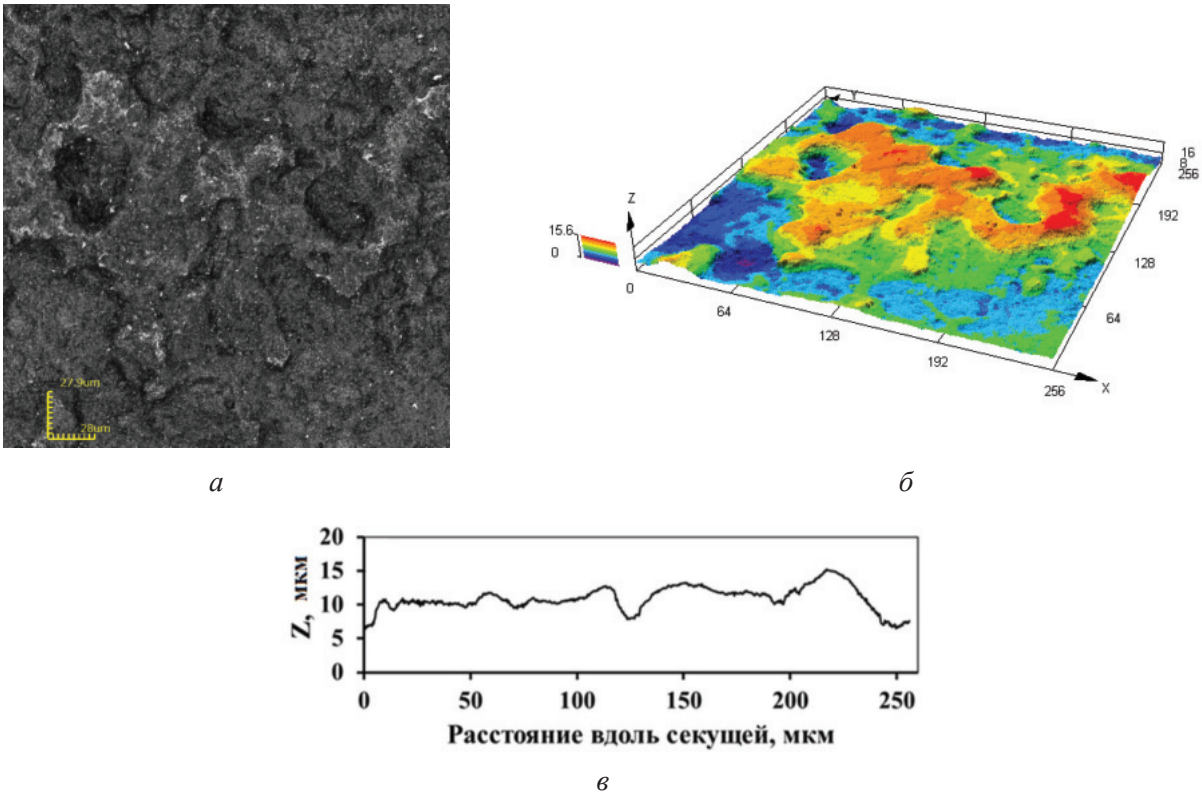
в виде лунок, а также валики, впадины и острые наплывы.

На рис. 5 показана томография поверхности образца после обработки на режиме № 1. Среднее значение параметра шероховатости по *Ra* = 1,53 мкм.

Исследование поверхности образца, подвергнутого обработке по режиму № 1, с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа (ЛКСМ) OLSLext 4000 показало, что обработанная поверхность плоская, с характерным микрорельефом, сформированным путем оплавления материала образца в процессе обработки. Наличия на обработанной поверхности образца пор или трещин не выявлено.

При увеличении энергии импульса (режим № 2) наблюдается интенсифицирование процесса плавления материала. Расплавленный сплав хаотично распространяется по поверхности, формируя неровности различной формы и размера. Этот процесс обусловливает различия в шероховатости поверхностного слоя материалов. В связи с тем, что поверхностный слой материала обрабатываемой заготовки подвергается интенсивному термическому воздействию при ЭЭО, на его поверхности формируются вторичные структуры. Установлено, что увеличение мощности ПВЭЭО на режиме № 2 при сохранении высоты обрабатываемого образца 10 мм не приводит к качественным изменениям обработанной поверхности (рис. 6, *а*). Однако при более высоких увеличениях (рис. 6, *б*) на обработанной поверхности выявляются микротрещины, формирующиеся в процессе высокоскоростного охлаждения расплавленного металла с более высоких температур, реализуемых за счет более интенсивного энерговложения по сравнению с режимом обработки № 1. На рис. 6, *б* отмечено наличие микротрещин в лунках на поверхности образца высотой 10 мм, обработанного на режиме № 2.

На рис. 7 представлен случайный участок поверхности образца из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П после режима № 2. Отмечено



а *б*

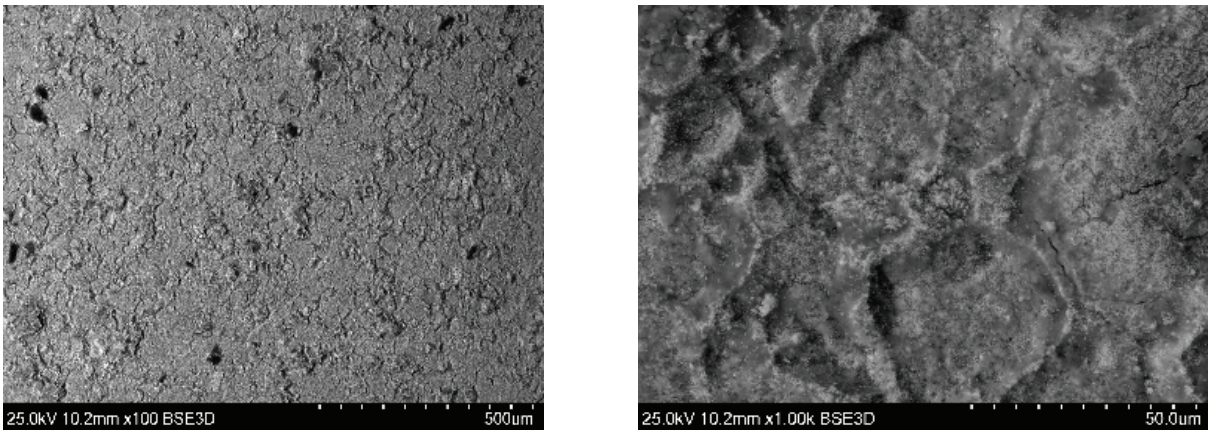
в

Рис. 5. ЛКСМ при увеличении ×500:

а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 1 с секущей; *б* – 3D-модель с температурной картой высот; *в* – график изменения микрорельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 5. CSLM at 500× magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 1 with a secant line; *б* – 3D model with a temperature map of heights; *в* – graph of microrelief variation along the secant line



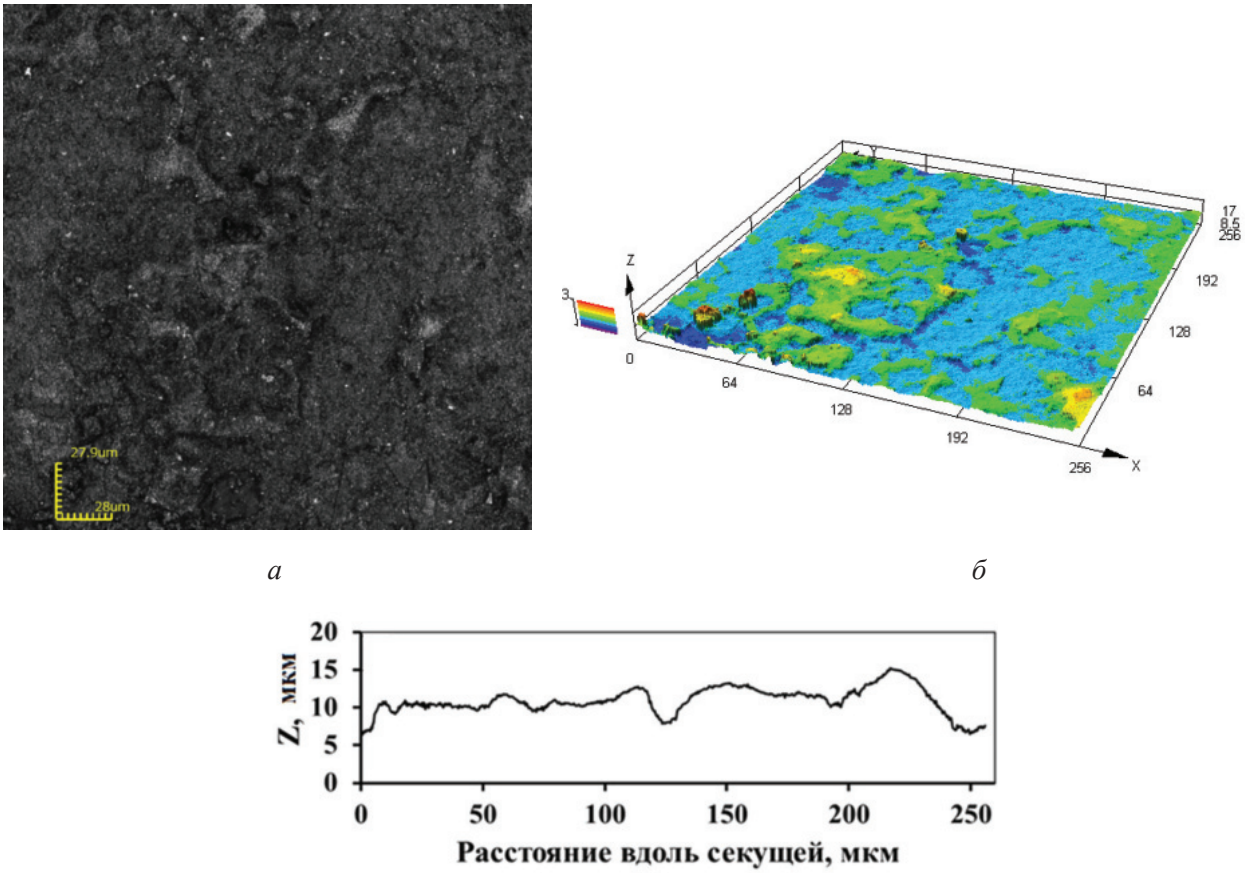
а *б*

Рис. 6. Поверхность образца, выполненного из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П после ПВЭЭО на режиме № 2, полученная при помощи СЭМ:

а – при увеличении ×100; *б* – при увеличении ×1000

Fig. 6. Surface of the specimen made of heat-resistant nickel alloy *VV751P* after *WEDM* in mode No. 2, obtained using *SEM:*

а – at 100× magnification; *б* – at 1,000× magnification



а *б*

в

Рис. 7. ЛКСМ при увеличении ×500:

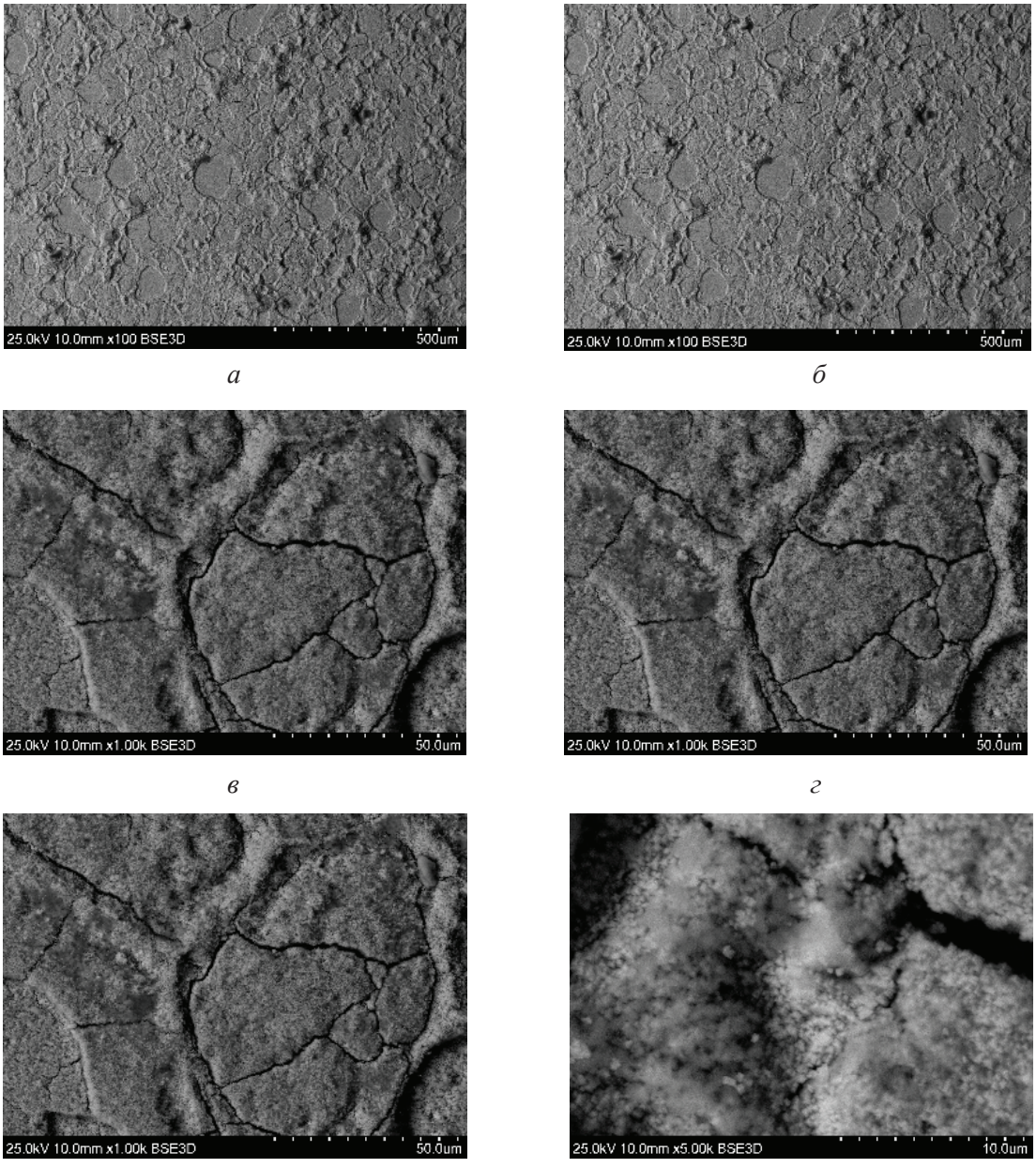
а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 2 с секущей; *б* – 3D-модель с температурной картой высот; *в* – график изменения микрорельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 7. CSLM at 500× magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 2 with a secant line; *б* – 3D model with a temperature map of heights; *в* – graph of microrelief variation along the secant line

меньшее развитие температурной карты высот в сравнении с режимом № 1. Установлено, что среднее значение шероховатости по параметру *Ra* = 1,62 мкм, это соотносится со значением параметра шероховатости на режиме № 1 и соответствует одному классу шероховатости.

С увеличением высоты обрабатываемого образца до 15 мм образование микротрещин на его поверхности в процессе электроэрозионной проволочной обработки интенсифицируется вне зависимости от мощности режима обработки (рис. 8, *а–е*). Действие вторичных разрядов показано на рис. 8. Финальный этап характеризуется явлениями кавитации, а также плазменного светящего факела (с характерным временем жизни 5 мс) из-за участившихся высокочастотных



а *б* *в* *г* *д* *е*

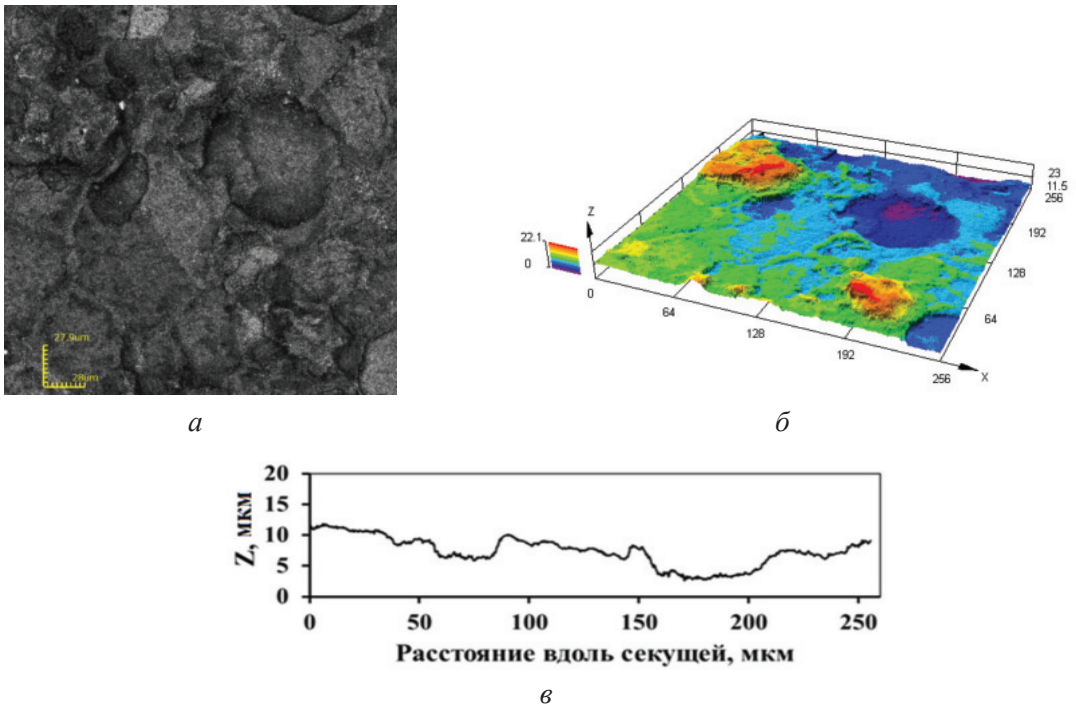
Рис. 8. Поверхность образцов, выполненных из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, после ПВВЭО на режиме (*а*) № 3 при увеличении ×100; (*б*) № 4 при увеличении ×100; (*в*) № 3 при увеличении ×1000; (*г*) № 4 при увеличении ×1000; (*д*) № 3 при увеличении ×5000; (*е*) № 4 при увеличении ×5000 (получено при помощи СЭМ)

Fig. 8. Surface of samples made of heat-resistant nickel alloy *VV751P*, after *WEDM* in the mode: (*а*) No. 3 at 100× magnification; (*б*) No. 4 100× magnification; (*в*) No. 3 1,000× magnification; (*г*) No. 4 at 1,000× magnification; (*д*) No. 3 at 5,000× magnification; (*е*) No. 4 at 5,000× magnification (obtained by *SEM*)

разрядов вблизи катода. В начале третьего этапа пузырьки парогазового слоя начинают схлопываться из-за уравновешивания внутреннего и внешнего давления за счет повышения локальной температуры, которая является производной приложенного давления. Это явление приводит к возникновению большого кавитационного удара, составляющего примерно 1010 МПа, дальнейшему активному увеличению параметра шероховатости поверхности и росту технологических трещин при ПВЭЭО жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.

При повышении энергии импульса, помимо увеличения параметра шероховатости, происходит зарождение технологических трещин, образуемых в результате ПВЭЭО. Быстрое нагревание заготовки до температуры 5000 °С с последующим резким охлаждением до температуры дистиллированной воды (20 °С) способствует возникновению трещин на обработанной поверхности. Это явление обусловлено воздействием термических напряжений, которые приводят к растрескиванию металла. Важным фактором, влияющим на образование трещин, является наличие впадин и отверстий, служащих концентраторами напряжений. После обработки поверхности образца высотой 15 мм на режиме № 3 относительно крупные микротрещины выявляются методом СЭМ при достаточно небольших увеличениях (рис. 8, *а*). При несколько бóльших увеличениях становится очевидно, что микротрещины на обработанной поверхности, в сравнении с поверхностями образцов высотой 10 мм и обработанными по режимам № 1 и 2, становятся более глубокими и разветвленными (рис. 8, *в*). Более подробные исследования обработанной поверхности при кратности увеличения ×5000 показали наличие мелкокристаллических образований субмикронного размера, по границам которых обнаруживаются микротрещины зигзагообразной формы, показанные стрелками на рис. 8, *д*.

Качественных изменений в микрорельефе поверхности образца высотой 15 мм, обработанной на режиме № 3, в сравнении с микрорельфом поверхности образца высотой 10 мм, обработанной по режиму № 2, не отмечено (рис. 9).



а *б*

в

Рис. 9. ЛКСМ при увеличении ×500:

а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 3 с секущей; *б* – 3D-модель с температурной картой высот; *в* – график изменения микрорельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 9. CSLM at 500× magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 3 with a secant line; *б* – 3D model with a temperature map of heights; *в* – graph of microrelief variation along the secant line

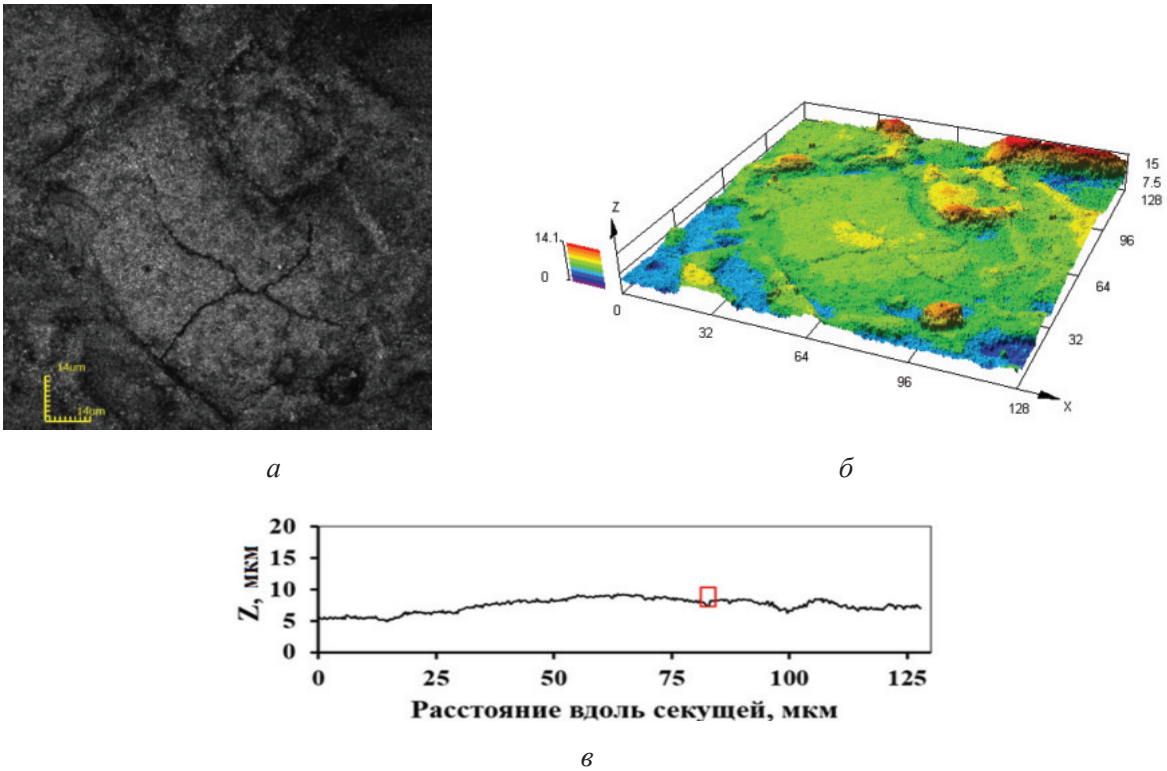
Значение параметра шероховатости по *Ra* = = 2,6 мкм после ПВЭЭО на режиме № 3.

На поверхности образца, обработанной на режиме № 4, также обнаруживается достаточно большое количество трещин и растрескиваний (рис. 8, *б*, *г*). Как показали исследования поверхности образца с помощью ЛКСМ (рис. 10), глубина таких трещин и растрескиваний превышает 1 мкм. Макроскопических дефектов в виде крупных пор или раковин не выявлено.

Формирование микротрещин и растрескиваний в образце, подвергнутом ПВЭЭО на режиме № 3, обусловлено образованием мелкокристаллических структур при высокоскоростной кристаллизации из расплава с повышенных температур. Увеличение высоты образца приводит к увеличению времени воздействия единичных импульсов. Как следствие, интенсифицируется термическое воздействие. Возникающие при этом напряжения вызывают образование микротрещин, которые впоследствии могут сливаться, образуя более крупные трещины. Значение величины параметра шероховатости по *Ra* составляет 3,4 мкм.

С увеличением высоты обрабатываемой заготовки происходит активное повышение концентрации энергии на поверхности обработки, что вызывает явление вторичных разрядов, негативно влияющих на концентрацию и интенсивность образования трещин на поверхности жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. Наличие трещин на поверхности негативно сказывается на эксплуатационной характеристике изделий, выполненных из жаропрочных никелевых сплавов.

Для определения времени, характера и механизма разрушения при действии циклических нагрузок на ответственные изделия из функциональных материалов проведены циклические испытания на малоцикловую усталость. Малоцикловая усталость отражает разрушение при упругопластическом деформировании изделия. Данные циклических испытаний указаны в табл. 2 и на усталостной диаграмме (рис. 11) соответственно.



а *б*

в

Рис. 10. ЛКСМ при увеличении ×500:

а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 4 с секущей; *б* – 3D-модель с температурной картой высот; *в* – график изменения микрорельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 10. CSLM at 500× magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 4 with a secant line; *б* – 3D model with a temperature map of heights; *в* – graph of microrelief variation along the secant line

Таблица 2
Table 2

Результаты циклических испытаний сплава ВВ751П
Results of cyclic tests of VV751P alloy

№ п/п	Напряжения в цикле нагружения		Количество циклов	Результат
	кН	МПа		
1	0,75	263	2,50E+05	Не разрушен
2	1	351	1,74E+05	Разрушен
3	2	702	1,90E+04	Разрушен
4	1,5	526	4,18E+04	Разрушен
5	1,2	421	1,62E+05	Разрушен
6	1,1	386	92 700	Разрушен

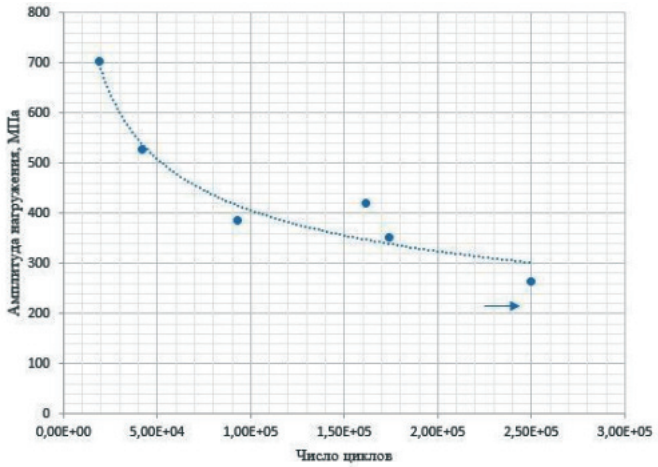


Рис. 11. Усталостная диаграмма сплава ВВ751П при малоцикловой усталости (стрелкой обозначен образец, который не разрушился за заданное количество циклов)

Fig. 11. Low-cycle fatigue diagram for the *VV751P* alloy (an arrow indicates a run-out sample that did not fracture after the specified number of cycles)

В результате исследования установлено, что при амплитуде нагружения 400 МПа достигается среднее значение числа циклов, которое составляет 1,50E+05 циклов. Отмечено уменьшение количества циклов при увеличении амплитуды циклов нагружения. На графике стрелкой обозначен образец, который не разрушился за заданное количество циклов.

Выводы

1. Проведен анализ дефектного (белого) слоя образцов. Установлено, что в процессе ПВЭЭО величина дефектного (белого) слоя постоянна после обработки и составляет порядка 10 мкм независимо от режима обработки.

2. Проанализирован показатель качества поверхности – шероховатости по *Ra*. Установлено, что среднее значение шероховатости по параметру *Ra* составляет 1,62 мкм при обработке образцы высотой 10 мм. При увеличении высоты значение шероховатости поверхности достигает 2,6 мкм на минимальном режиме и 3,4 мкм – на максимальном.

3. Установлено, что с увеличением высоты заготовки происходит образование микротрещин на поверхности изделия, которые увеличиваются на максимальном режиме. Формирование трещин связано с интенсификацией взаимодействия единичных импульсов с обрабатываемой поверхностью. При обработке образца высотой 10 мм отмечено отсутствие пор и трещин на поверхности. При обработке образцов высотой 15 мм установлено наличие трещин на поверхности, достигающих в длину 50…60 мкм.

4. В результате исследования установлено, что при амплитуде нагружения 400 МПа достигается среднее значение числа циклов, которое составляет 1,50E+05 циклов. Отмечено уменьшение количества циклов при увеличении амплитуды циклов нагружения.

Список литературы

1. *Nowotnik A.* Nickel-based superalloys // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2016. – Vol. 107 (2). – P. 1–6. – DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02574-1.

2. *Neumeier S., Freund L.P., Göken M.* Novel wrought γ/γ′ cobalt base superalloys with high strength and improved oxidation resistance // Scripta Materialia. – 2015. – Vol. 109. – P. 104–107. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.07.030.

3. 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.

4. *Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.* Газотурбинные двигатели. – Пермь: Авиадвигатель, 2006. – 1204 с.

5. *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.

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. *LotfiNeyestanak A.A., Daneshmand S.* The effect of operational cutting parameters on Nitinol-60 in wire electrodischarge machining // Advances in Materials Science and Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–6. – DOI: 10.1155/2013/457186.

8. *Sharma N., Raj T., Jangra K.K.* Parameter optimization and experimental study on wire electrical discharge machining of porous Ni40Ti60 alloy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2013. – Vol. 231 (6). – P. 956–970. – DOI: 10.1177/0954405415577710.

9. *Safranski D., Dupont K., Gall K.* Pseudoelastic NiTiNOL in orthopaedic applications // Shape Memory and Superelasticity. – 2020. – Vol. 6. – P. 332–341. – DOI: 10.1007/s40830-020-00294-y.

10. *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.

11. *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/asem.2020.2586.

12. 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.

13. *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). – P. 231–240. – DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.

14. *Sharakhovsky L.I., Marotta A., Essiptchouk A.M.* Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process // Applied Surface Science. – 2006. – Vol. 253. – P. 797–804. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.01.013.

15. *Barenji R.V., Pourasl H.H., Khojastehnezhad V.M.* Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio // Precision Engineering. – 2016. – Vol. 45. – P. 435–444.

16. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM / F. Klocke, S. Schneider, L. Ehle, H. Meyer, L. Hensgen, A. Klink // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 580–585. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.263.

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. – 2013. – Vol. 41. – 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. *Puri A.B., Bhattacharyya B.* Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – Vol. 25 (3). – P. 301–307. – DOI: 10.1007/s00170-003-2045-8.

20. *Ablyaz T.R., Zhurin A.* Influence of wire-cut electrical discharge machining on surface quality // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (2). – P. 156–158. – DOI: 10.3103/S1068798X16020039.

21. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: a review paper / M. Brown, D. Wright, R.M. Saoubi, J.M. Gourlay, M. Wallis, A. Mantle, P. Crawforth, H. Ghadbeigi // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2018. – Vol. 23. – P. 39–53. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.10.001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 34–47
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-34-47

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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

Improvement the manufacturing quality of new generation heat-resistant nickel alloy products using wire electrical discharge machining

Evgeniy Shlykov [a, *], ***Timur Ablyaz*** [b], ***Vladimir Blokhin*** [c], ***Karim Muratov*** [d]

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-8076-0509, Kruspert@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-6607-4692, lowrider11-13-11@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0009-0009-2693-6580, warkk98@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0001-7612-8025, Karimur_80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 12 December 2024
Revised: 19 December 2024
Accepted: 28 December 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Wire electrical discharge machining
Surface roughness
Accuracy
Microcracks
Surface layer
Cyclic testing

Funding
The research was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01224, https://rscf.ru/project/23-79-01224/.

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of an experimental study on the quantitative and qualitative evaluation of the surface after wire electrical discharge machining (*WEDM*). **The purpose of this study** is an experimental investigation with qualitative and quantitative analysis of surface defects in samples made of a heat-resistant nickel alloy *VV751P* after *WEDM*. **Methods of research.** Samples for the study with a specific geometry were obtained by the wire electrical discharge machining method in 4 modes. The operating parameters were: workpiece height (h, mm), pulse-on time (T_{on}, μs), and pulse-off time (T_{off}, μs). The samples were studied using a *Hitachi S-3400N* electron microscope in backscattered electron mode at 25 kV. Surface topography after electrical discharge machining was evaluated using a laser scanning microscope (*LSM*) *LextOLS4000*. Cyclic tests were performed on a universal testing machine *Biss-00-100* at a test frequency of 20 Hz in a symmetrical cycle (R = −1). **Results and discussion.** The defective (white) layer of samples was analyzed. It is established that during wire electrical discharge machining the thickness of defective white layer is within 10 μm, both after processing in minimum and maximum mode. The surface quality index (surface roughness *Ra*) was analyzed. It was found that the average value of surface roughness parameter *Ra* is 1.62 μm when processing samples with a height of 10 mm. When the sample height increases, the surface roughness value reaches 2.6 μm after processing in minimum mode and 3.4 μm after processing in maximum mode. It is established that with an increase in workpiece height, the number of microcracks on the surface of the product increases, which is associated with the intensification of the interaction of single pulses with the processed surface. As a result of the study, it is found that at a loading amplitude of 400 MPa, an average value of the number of cycles reaches 1.50E + 05 cycles. A decrease in the number of cycles is observed with an increase in the amplitude of the loading cycles.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Muratov K.R. Improvement the manufacturing quality of new generation heat-resistant nickel alloy products using wire electrical discharge machining. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 34–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-34-47. (In Russian).

References

1. Nowotnik A. Nickel-based superalloys. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016, vol. 107 (2), pp. 1–6. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02574-1.

2. Neumeier S., Freund L.P., Göken M. Novel wrought γ/γ′ cobalt base superalloys with high strength and improved oxidation resistance. *Scripta Materialia*, 2015, vol. 109, pp. 104–107. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.07.030.

3. 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.

4. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm', Aviadvigatel' Publ., 2006. 1204 p.

*** 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

5. 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.

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. LotfiNeyestanak A.A., Daneshmand S. The effect of operational cutting parameters on Nitinol-60 in wire electrodischarge machining. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1155/2013/457186.

8. Sharma N., Raj T., Jangra K.K. Parameter optimization and experimental study on wire electrical discharge machining of porous Ni40Ti60 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, vol. 231 (6), pp. 956–970. DOI: 10.1177/0954405415577710.

9. Safranski D., Dupont K., Gall K. Pseudoelastic NiTiNOL in orthopaedic applications. *Shape Memory and Superelasticity*, 2020, vol. 6, pp. 332–341. DOI: 10.1007/s40830-020-00294-y.

10. 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.

11. 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/asem.2020.2586.

12. 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.

13. 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.

14. Sharakhovsky L.I., Marotta A., Essiptchouk A.M. Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 253, pp. 797–804. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.01.013.

15. Barenji R.V., Pourasl H.H., Khojastehnezhad V.M. Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio. *Precision Engineering*, 2016, vol. 45, pp. 435–444.

16. Klocke F., Schneider S., Ehle L., Meyer H., Hensgen L., Klink A. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 580–585. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.263.

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*, 2013, vol. 41, 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. T*he International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 4 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.

19. Puri A.B., Bhattacharyya B. Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 25 (3), pp. 301–307. DOI: 10.1007/s00170-003-2045-8.

20. Ablyaz T.R., Zhurin A. Influence of wire-cut electrical discharge machining on surface quality. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36 (2), pp. 156–158. DOI: 10.3103/S1068798X16020039.

21. Brown M., Wright D., Saoubi R.M., Gourlay J.M., Wallis M., Mantle A., Crawforth P., Ghadbeigi H. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: a review paper. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, vol. 23, pp. 39–53. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.10.001.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

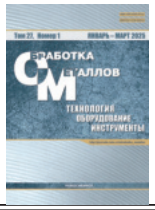
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 48–60
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-48-60

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Прогнозирование изменений поверхностного слоя в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки

Тимур Абляз [a], ***Илья Осинников*** [b], ***Евгений Шлыков*** [c, *], ***Анна Каменских*** [d], ***Александр Горохов*** [e], ***Никита Кропанев*** [f], ***Карим Муратов*** [g]

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/0009-0006-4478-3803, ilyuhaosinnikov@bk.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-8076-0509, Kruspert@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-3012-2418, anna_kamenskih@mail.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0000-5588-0154, littlealex99@mail.ru; [f] https://orcid.org/0009-0002-5907-9852, cropanew.nikita2016@yandex.ru;
[g] https://orcid.org/0000-0001-7612-8025, Karimur_80@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:
Поступила: 13 декабря 2024
Рецензирование: 19 декабря 2024
Принята к печати: 28 декабря 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Копировально-прошивная электроэрозионная обработка
Математическая модель
Хромсодержащая сталь
Лункообразование
Металлография
Белый слой
Сплошность

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01224, https://rscf.ru/project/23-79-01224/.

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований толщины, сплошности и количества дефектов белого слоя, образованного в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО) на примере низколегированной стали 40Х и среднелегированной стали 35ХГС. **Цель работы:** теоретическое и экспериментальное исследование дефектного поверхностного слоя, образованного в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки. **Методы исследования.** Математические модели единичного импульса разряда на обрабатываемую поверхность получены методом конечных элементов. В качестве оборудования для КПЭЭО образцов из хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС выбран копировально-прошивной электроэрозионный станок Electronica Smart CNC. Моделирование и эксперименты проведены для двух режимов. Рабочие параметры: время включения импульса – T_{on}, мкс; напряжение – U, В; сила тока – I, А. Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе Olympus GX 51. **Результаты и обсуждение.** Разработаны математические модели воздействия единичного импульса на обрабатываемую поверхность разряда в процессе КПЭЭО, позволяющие прогнозировать толщину белого слоя в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала. Теоретические значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20…25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 60…80 мкм на максимальном режиме. Установлено, что экспериментальные значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20…25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 55…85 мкм – на максимальном. Отклонения теоретических значений толщины белого слоя от экспериментальных составляют не более 5 %, что подтверждает правильность полученных моделей. Установлено, что при КПЭЭО на минимальном режиме сплошность белого слоя в среднем в два раза больше, чем при обработке на максимальном режиме. Сплошность белого слоя стали 40Х выше в сравнении со сталью 35ХГС на 10 % при КПЭЭО на максимальном режиме и на 17 % – на минимальном. Выявлено, что при обработке на максимальном режиме количество микротрещин более чем в 2 раза превышает их количество при обработке на минимальном режиме.

Для цитирования: Прогнозирование изменений поверхностного слоя в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки / Т.Р. Абляз, И.В. Осинников, Е.С. Шлыков, А.А. Каменских, А.Ю. Горохов, Н.А. Кропанев, К.Р. Муратов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 48–60. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-48-60.

Введение

Развитие современного машиностроения связано с появлением новых, технически усовершенствованных изделий и конструкций. Изготовление высококачественных изделий является одной из приоритетных задач. Ужесточаются условия эксплуатации изделий, и соответственно требования к их эксплуатационным свойствам также постоянно растут. Для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик изделий возникает необходимость применения материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Важными показателями обеспечения конкурентоспособности изделия являются массово-

***Адрес для переписки**
Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр., 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел.: +7 961 759-88-49, **e-mail:** Kruspert@mail.ru

габаритные характеристики. Ввиду этого применяются все более пространственно-сложные конструктивные элементы, позволяющие обеспечить минимальные массу и размеры изделия при соблюдении требований прочности и жесткости.

Наиболее распространенными технологиями изготовления изделий сложного профиля являются механические методы обработки. Недостатки традиционных лезвийных методов обработки: значительный износ режущего инструмента при резании высокотвердых материалов, необходимость применения дополнительной оснастки при многокоординатной обработке сложного профиля, невозможность обработки тонкостенных элементов ввиду силового воздействия со стороны режущего инструмента [1–3].

При изготовлении сложнопрофильных изделий из материалов с повышенными физико-механическими свойствами рационально использовать альтернативные электрофизические методы обработки, позволяющие обрабатывать материалы любой твердости при практически полном отсутствии сил резания. Одним из таких методов является метод электроэрозионной обработки (ЭЭО) [4–10].

Существенным недостатком, ограничивающим применение данного электрофизического метода, являются термометаллургические преобразования в поверхностном слое обрабатываемого материала. В процессе удаления частиц материала с обрабатываемой поверхности происходит пиролиз рабочей жидкости, наблюдается изменение структуры и свойств поверхностного слоя материала изделия [11, 12].

Процесс ЭЭО характеризуется локальным перегревом материала в зоне обработки, что приводит к возникновению явления, известного как хрупкое разрушение. При хрупком разрушении возникают температурные напряжения вследствие перегрева поверхностного слоя обрабатываемого материала. При превышении термическими напряжениями временного сопротивления обрабатываемого материала происходит удаление материала из зоны обработки. Причем частицы материала не подвергаются процессам плавления и испарения, а удаляются в твердой фазе, в результате чего возникают сколы и трещины [13, 14].

Из-за значительного перегрева в зоне обработки происходит перезакалка и отпуск обрабатываемого материала. Возникают внутренние напряжения, которые в совокупности с измененными физико-механическими свойствами материала могут стать причиной преждевременного выхода из строя изделия при эксплуатации или брака на этапе изготовления [15].

Явление хрупкого разрушения материала в процессе ЭЭО характеризуется большим количеством микротрещин на обрабатываемой поверхности [16]. Наличие микротрещин на рабочих поверхностях изделия может приводить к его преждевременному разрушению вследствие распространения трещин в основной материал, что в свою очередь приведет к выходу из строя отдельного узла или всего изделия в целом.

Зоной поверхностного слоя, содержащей наибольшее количество дефектов, является так называемый белый слой. Белый слой имеет мелкозернистую структуру, обладающую высокой химической стойкостью. Толщина слоя колеблется от сотых долей миллиметра до 1,5 мм.

Белый слой на обработанной поверхности, образованный в процессе ЭЭО, имеет повышенную хрупкость. Его наличие существенно снижает прочностные характеристики материала, в особенности способность сопротивляться циклическим нагрузкам. Анализ литературы в области ЭЭО показал, что увеличение толщины белого слоя приводит к снижению усталостной долговечности материала [17].

Толщина белого слоя и его многократное появление на поверхности заготовки определяется множеством различных факторов [18], одним из которых является режим обработки. Параметры электрического процесса могут существенно влиять на толщину белого слоя [19]. С увеличением силы тока и продолжительности импульса количество энергии, подводимой к заготовке, вызывает плавление и испарение большего объема материала [11]. Уменьшение времени включения импульса на электроэрозионном станке позволяет снизить толщину белого слоя и его сплошность из-за меньшего количества энергии в зоне обработки. Снижение параметра напряжения также приводит к уменьшению толщины белого слоя [20].

В настоящее время не в полной мере изучен процесс формирования поверхностного слоя, а также величины его сплошности и механизмы

формирования микротрещин на поверхности заготовок из труднообрабатываемых материалов при копировально-прошивной электроэрозионной обработке (КПЭЭО). Номенклатура материалов, для которых исследован процесс образования белого слоя в процессе обработки, сильно ограничена.

Актуальной задачей является разработка теоретических зависимостей, позволяющих прогнозировать преобразования поверхностного слоя в процессе обработки, а также толщину, структуру и свойства образованного измененного слоя.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование дефектного поверхностного слоя, образованного в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Задачи

1. Разработать теоретическую модель единичного импульса в процессе КПЭЭО с возможностью ее применения для различных материалов, позволяющую прогнозировать толщину белого слоя. Получить теоретические значения толщины белого слоя для хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

2. Провести экспериментальные исследования толщины белого слоя, образованного в процессе КПЭЭО, для верификации разработанных моделей на примере хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

3. Провести экспериментальные исследования сплошности белого слоя после КПЭЭО хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

4. Провести экспериментальные исследования влияния режимов КПЭЭО на количество видимых дефектов на обработанной поверхности хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

Методика исследований

Эксперименты проводились на базе Центра коллективного пользования «Центр аддитивных технологий» кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». В рамках исследования выполнено моделирование единичного импульса разряда на обрабатываемую поверхность методом конечных элементов. Модель состоит из трех частей: 1) определение поля температур в детали от действия распределенного теплового потока; 2) моделирование образования лунки; 3) определение поля температур в детали при ее остывании между импульсами.

Все поставленные задачи решались методом конечных элементов с использованием 8-узлового элемента в программном пакете ANSYS Mechanical APDL.

Для решения приняты следующие допущения и гипотезы: изотропность обрабатываемого материала; независимость свойств обрабатываемого материала от температуры; постоянство коэффициента конвективного теплообмена; пренебрежение потерями энергии на изменение агрегатного состояния материала; постоянство межэлектродного зазора.

При моделировании теплового импульса рассматривалось воздействие распределенного теплового потока на поверхность электрода-детали.

Уравнение теплопроводности в осесимметричной постановке в нестационарной задаче имеет вид

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=-k\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \qquad (1)$$

где r – текущий радиус; z – текущая высота.

Область $ABCD$ принята областью действия рабочего импульса (рис. 1).

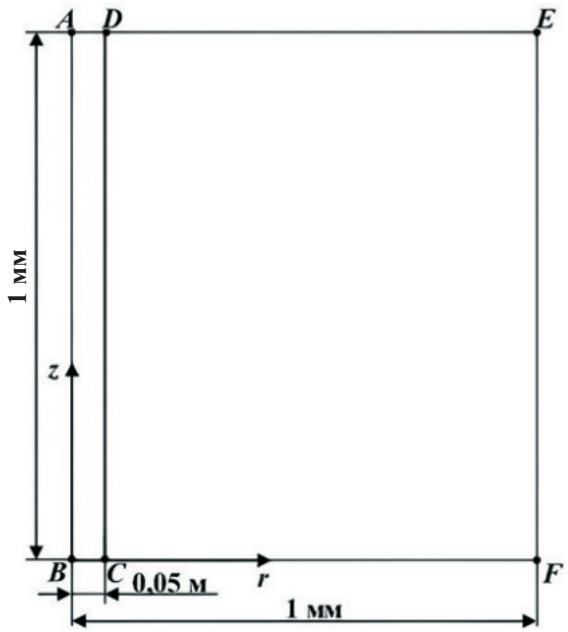


Рис. 1. Расчетная схема, обозначение границ для рабочего импульса

Fig. 1. Design diagram, boundary designation for the working impulse

На границе *AB* действует условие осевой симметрии тепловой задачи.

Границы *DE* и *EF* омываются рабочей жидкостью (РЖ). В качестве первого приближения опишем эти границы как конвективный теплообмен и положим коэффициент конвективного теплообмена константой. Условие на этих границах принимает вид

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{DE,EF} = h(T - T_\infty). \qquad (2)$$

Условие термоизоляции на границах *BC* и *CF*:

$$T\Big|_{CD,\,CF} = 20\ ^\circ\text{C}. \qquad (3)$$

Условие на границе *AD* для нормального закона распределения:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{DE,EF} = \eta\frac{IU}{\pi R_p^2}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(r)^2}{2\sigma^2}}. \qquad (4)$$

Начальное условие во всех точках тела принято в следующем виде:

$$T(0, r, z) = 20\ ^\circ\text{C}. \qquad (5)$$

При моделировании процесса остывания между импульсами использована схема, показанная на рис. 2, и уравнение равновесия задачи теплопроводности (1).

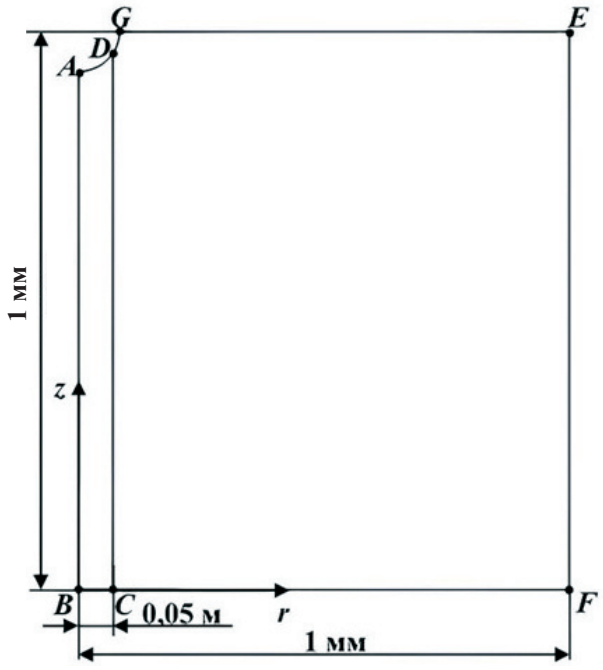


Рис. 2. Расчетная схема, обозначение границ процессов после теплового воздействия

Fig. 2. Design diagram, boundary designation for processes after thermal exposure

На границе *AB* при $r = 0$ действует условие осевой симметрии тепловой задачи.

Границы *AD, DG, GE* и *EF* обрабатываемой детали омываются рабочей жидкостью (РЖ). В качестве первого приближения опишем эти границы как конвективный теплообмен и положим коэффициент конвективного теплообмена константой. Условие на этих границах принимает вид

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{AD,\,DG,\,GE,\,EF} = h(T - T_\infty). \qquad (6)$$

Условие термоизоляции на границах *BC* и *CF*:

$$T\Big|_{BC,\,CF} = 20\ ^\circ\text{C}. \qquad (7)$$

Начальное условие во всех точках тела принято в следующем виде:

$$T(0, r, z) = T(T_{\text{импульса}}, r, z), \qquad (8)$$

это поле температур после теплового воздействия.

Время охлаждения определялось с учетом скважности импульса, принятой 26 %.

Моделирование осуществлено для двух режимов ЭЭО, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры режимов КПЭЭО

Parameters of the copy-piercing EDM modes

Параметр	Режим обработки	
	min	max
Сила тока *I*, А	2	8
Напряжение *U*, В	50	100
Время действия импульса T_{on}, мкс	40	150

В рамках данного исследования получены модели, рассчитанные для низколегированной стали 40Х и среднелегированной стали 35ХГС. Свойства, использованные в качестве входных параметров моделирования, представлены в табл. 2.

Решение выполнено методом конечных элементов. Для моделирования образования лунки принимали за условие удаления элемента превышение его температурой значения температуры плавления. Удаление элементов выполнялось за счет обнуления «жесткости» элементов тепловой задачи.

Таблица 2
Table 2

Входные параметры моделирования
Input parameters for simulation

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение	
			40Х	35ХГС
Коэффициент температуропроводности	K	Вт/(м·°С)	46	36
Удельная теплоемкость	C	Дж/(кг·°С)	466	496
Плотность	ρ	кг/м^3	7800	7800
Доля энергии импульса	μ	–	0,6	0,6
Коэффициент теплоотдачи	k	Вт/(м·°С)	300	300
Температура плавления	$T_{пл}$	°С	1250	1280

Проведены эксперименты по КПЭЭО образцов на указанных режимах (табл. 1). В качестве оборудования для КПЭЭО образцов из хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС выбран копировально-прошивной электроэрозионный станок Electronica Smart CNC. Обработка осуществлялась в среде трансформаторного масла (ГОСТ 982–80).

Для экспериментальных исследований толщины, сплошности и трещиноватости белого слоя, образованного в процессе КПЭЭО, в зависимости от параметров обработки и обрабатываемого материала изготовлены цилиндрические образцы диаметром 35 мм, длиной 20 мм из низколегированной стали 40Х и среднелегированной стали 35ХГС.

Для экспериментов методом фрезерования изготовлены медные электроды-инструменты (медь марки М1 ГОСТ 1173–2006) размерами 20×20×5мм.

После КПЭЭО были подготовлены микрошлифы. Для запрессовки образцов в бакелит использовалась установка для горячей запрессовки Top Tech Presidon. Финишная подготовка образцов осуществлена на шлифовальной установке Top Tech Plato. Шлифование произведено с использованием абразива зернистостью от р240 до р1500.

Исследования обработанной поверхности на предмет наличия трещин, а также микрошлифов для исследования толщины и сплошности белого слоя осуществлены металлографическим методом. Металлографические исследования произведены на оптическом микроскопе Olympus GX 51 при увеличении 100…200 крат с применением программного пакета Olympus Stream Motion для обработки полученных изображений. Для выявления белого слоя микрошлифы образцов были протравлены 4%-м раствором азотной кислоты.

Результаты и их обсуждение

Результат образования лунки представлен на рис. 3.

На рис. 3 также указаны поля температур после остывания между импульсами. Размер ячейки конечно-элементной сетки составляет 5 мкм.

В процессе образования лунки на обработанной поверхности остается зона, в которой материал электрода-детали нагревается выше температуры плавления, после чего подвергается моментальному охлаждению. Эта зона представляет собой белый слой, концентрирующий в себе большую часть дефектов. Дефекты появляются из-за возникших в результате перезакалки напряжений и изменения элементного состава вследствие насыщения элементами рабочей жидкости и материала ЭИ.

Полученная схема позволяет выполнить моделирование серии единичных воздействий на поверхность электрода-детали с учетом эволюции геометрии поверхности. В дальнейшем возможно использование разработанной модели для прогнозирования размеров лунки и общей шероховатости поверхности, обработанной методом

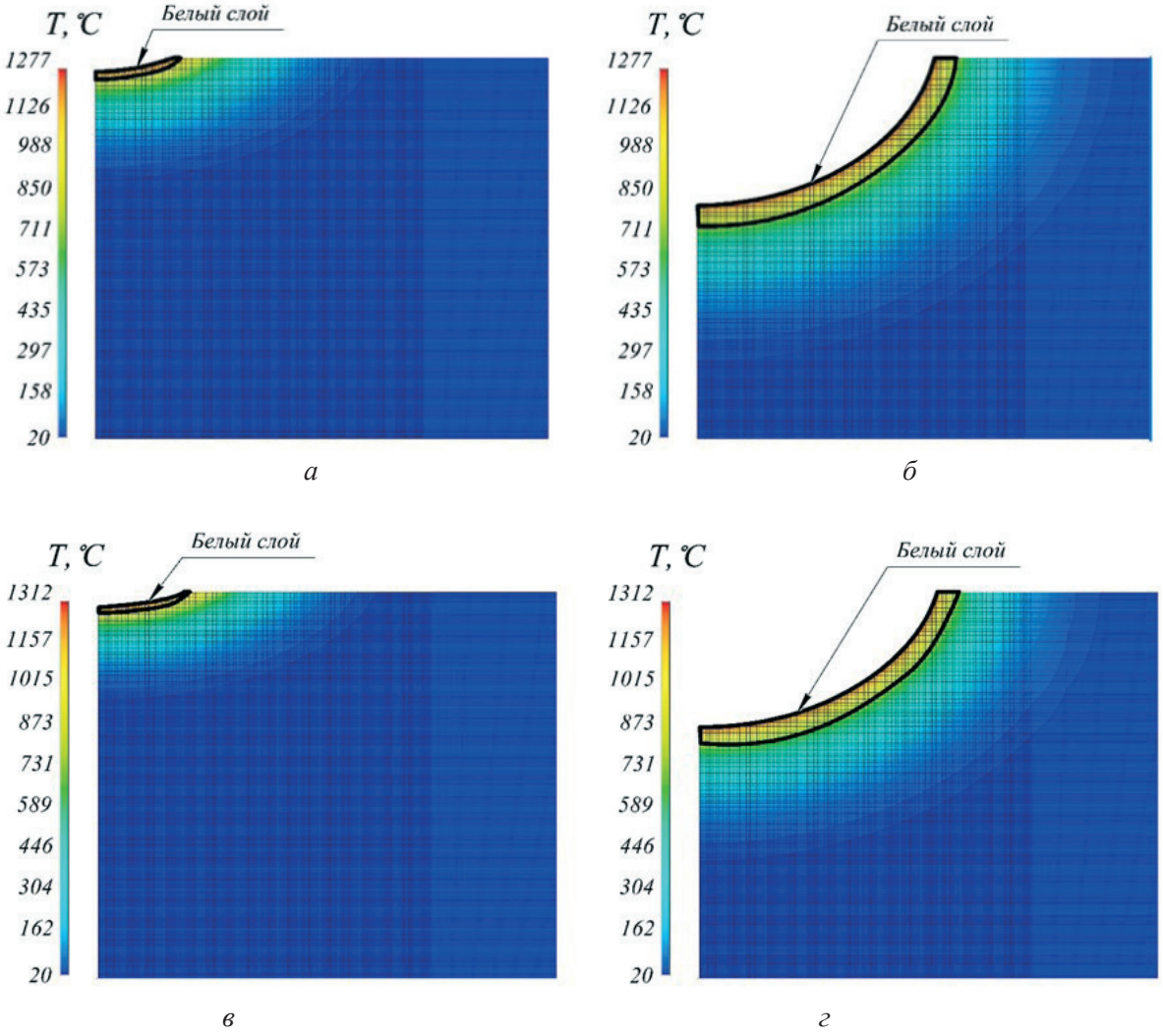


Рис. 3. Поля распределения температур при образовании лунки:
а – 40Х, min; *б* – 40Х, max; *в* – 35ХГС, min; *г* – 35ХГС, max

Fig. 3. Temperature distribution fields during crater formation:
а – 0.4 C-Cr, min; *б – 0.4 C-Cr*, max; *в – 0.35 C-Cr-Mn-Si*, min; *г – 0.35 C-Cr-Mn-Si*, max

КПЭЭО, в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала.

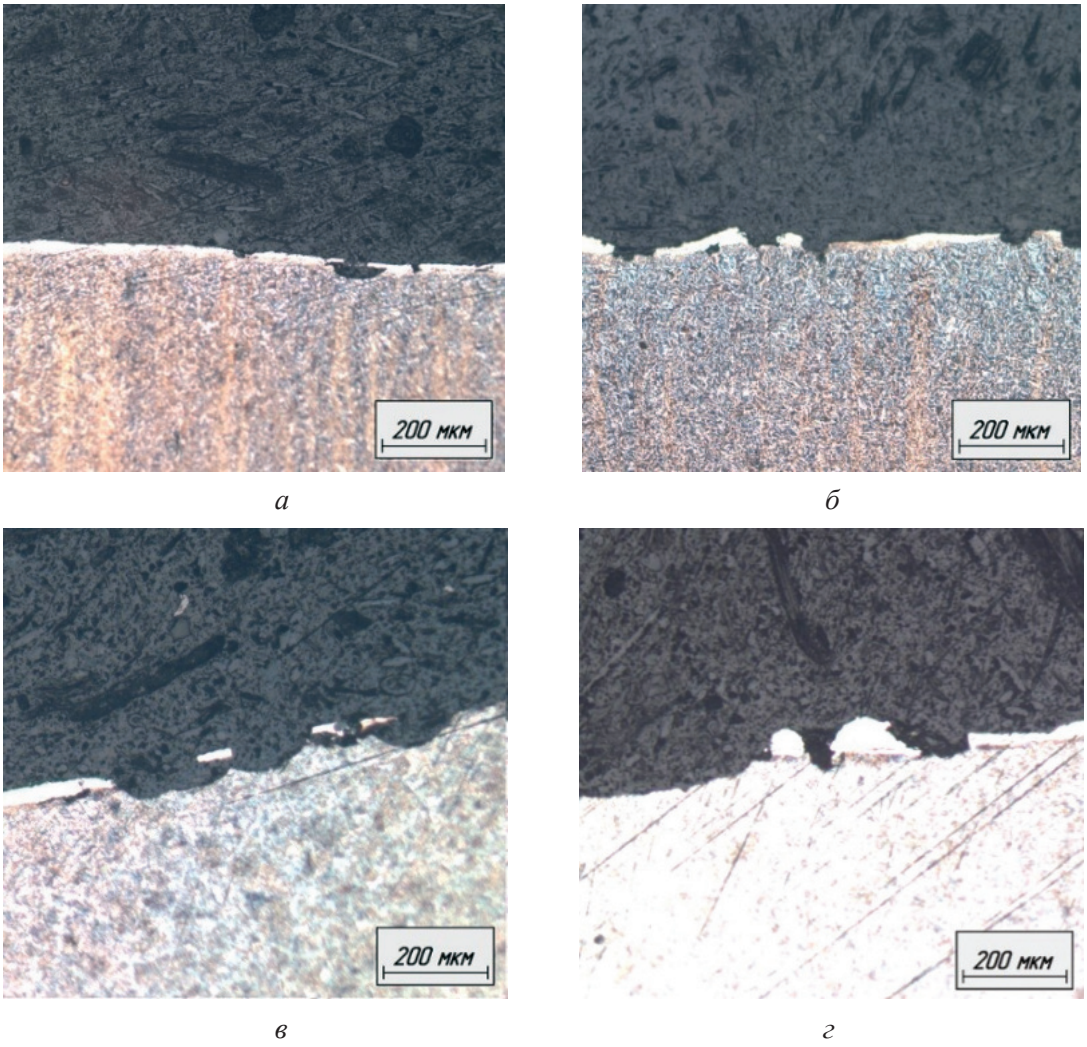
В табл. 3 представлены теоретические значения толщины белого слоя, образованного в процессе КПЭЭО, полученные на основе анализа рис. 3.

На рис. 4 представлены изображения, полученные в результате металлографического исследования микрошлифов образцов сталей 35ХГС и 40Х после копировально-прошивной обработки на максимальном и минимальном режимах.

Таблица 3
Table 3

Теоретические значения толщины белого слоя
Theoretical values of white layer thickness

Режим КПЭЭО	Среднее значение толщины белого слоя, мкм	
	40Х	35ХГС
Min	25	20
Max	80	60



а *б*

в *г*

Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя образцов после КПЭЭО при увеличении 200×:

а – 40Х, min; *б* – 40Х, max; *в* – 35ХГС, min; *г* – 35ХГС, max

Fig. 4. Microstructure of the surface layer of samples after copy-piercing *EDM* at 200× magnification:

а – 0.4 C-Cr, min; *б – 0.4 C-Cr*, max; *в – 0.35 C-Cr-Mn-Si*, min; *г – 0.35 C-Cr-Mn-Si*, max

При визуальной оценке фотографий видно, что в процессе КПЭЭО на обрабатываемой поверхности сталей 40Х и 35ХГС образуется характерный белый слой. В зависимости от режимов обработки толщина такого слоя может значительно различаться (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Экспериментальные значения толщины белого слоя

Experimental values of white layer thickness

Режим КПЭЭО	Среднее значение толщины белого слоя, мкм	
	40Х	35ХГС
Min	23,86	20,79
Max	83,00	58,00

Для сравнения теоретических и экспериментальных значений толщины белого слоя построена гистограмма (рис. 5).

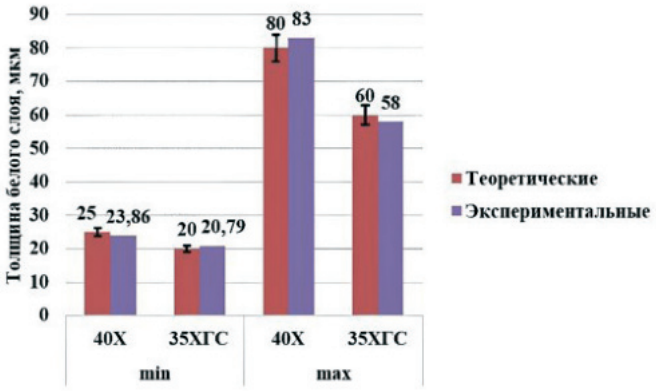


Рис. 5. Гистограмма значений толщины белого слоя

Fig. 5. Histogram of white layer thickness values

На основе анализа рис. 5 можно сделать вывод, что экспериментальные значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20…25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 55…85 мкм на максимальном режиме.

Установлено, что при КПЭЭО на одинаковых режимах значения толщины белого слоя низколегированной стали 40Х больше значений для среднелегированной стали 35ХГС. Это можно обосновать большей теплопроводностью и меньшей температурой плавления стали 40Х.

Наблюдается корреляция теоретических и экспериментальных значений. Выявлено, что отклонения теоретических значений толщины белого слоя от экспериментальных отличаются не более чем на 5 %, это подтверждает правильность полученных моделей.

Показано, что полученные теоретические модели образования лунки в процессе КПЭЭО позволяют с заявленной точностью в зависимости от параметров обработки и физико-механических характеристик обрабатываемого материала спрогнозировать толщину образованного в процессе обработки белого слоя.

На основе анализа рис. 4 установлено, что белый слой, образованный в процессе КПЭЭО сталей 40Х и 35ХГС, распределен неравномерно, наблюдаются многочисленные пустоты и полости. Для оценки сплошности белого слоя выполнена количественная оценка общей площади белого слоя на микрошлифах и пустот (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

Сплошность белого слоя обработанной поверхности при КПЭЭО

Continuity of the white layer of the machined surface after copy-piercing EDM

Режим КПЭЭО	Сплошность белого слоя, %	
	40Х	35ХГС
Min	94,00	51,00
Max	84,00	34,00

На основе полученных данных построена гистограмма (рис. 6).

Анализ гистограммы показал, что режим КПЭЭО оказывает значительное влияние на сплошность белого слоя обработанных хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС. При КПЭЭО на максимальном режиме сплошность белого слоя в среднем в два раза меньше, чем при обработке на минимальном режиме.

Выявлено, что сплошность белого слоя стали 40Х выше в сравнении со сталью 35ХГС на 10 % при КПЭЭО на максимальном режиме и на 17 % при КПЭЭО на минимальном режиме.

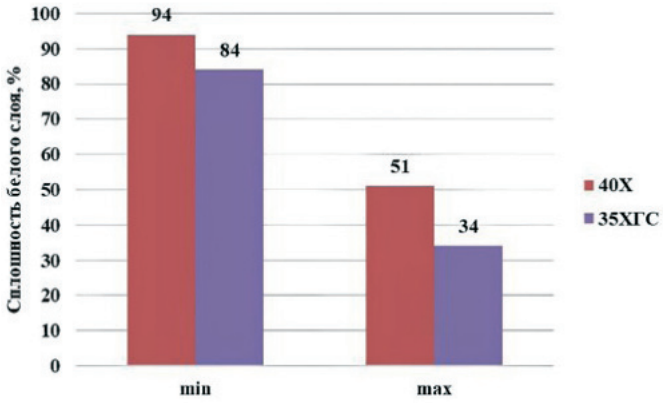


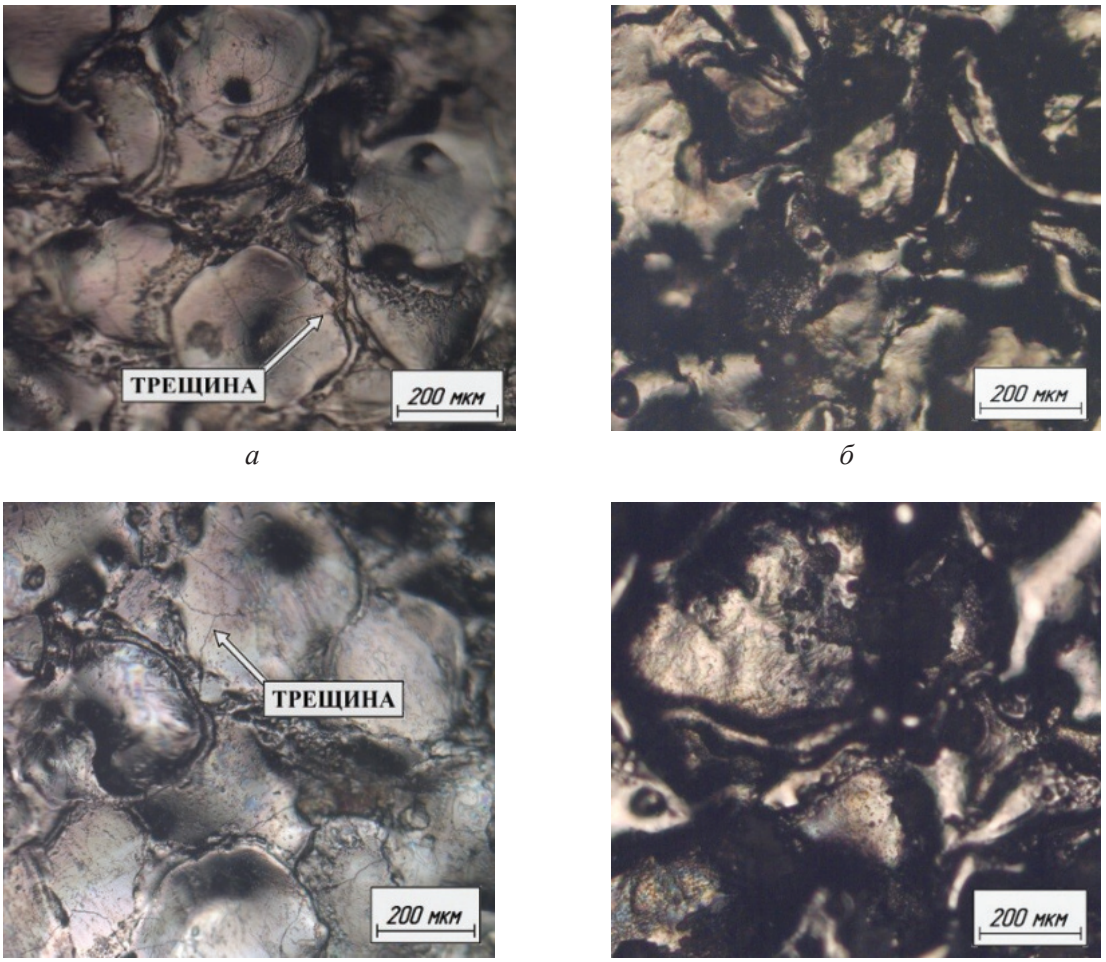
Рис. 6. Гистограмма сплошности белого слоя

Fig. 6. Histogram of white layer continuity

Снимки обработанной поверхности образцов сталей 35ХГС и 40Х представлены на рис. 7.

При визуальной оценке результатов металлографического исследования установлено, что в процессе КПЭЭО сталей 35ХГС и 40Х на обработанной поверхности образуется множество микротрещин. Произведена оценка количества микротрещин на единицу площади поверхности, обработанной электроэрозионным методом. В табл. 6. представлены результаты количественной оценки.

На основе полученных данных о количестве микротрещин построена гистограмма (рис. 8).



а *б*

в *г*

Рис. 7. Поверхность образцов после КПЭЭО при увеличении 200×:
а – 40Х, min; *б* – 40Х, max; *в* – 35ХГС, min; *г* – 35ХГС, max

Fig. 7. Surface of samples after copy-piercing *EDM* at 200× magnification:
а – 0.4 C-Cr, min; *б – 0.4 C-Cr*, max; *в – 0.35 C-Cr-Mn-Si*, min; *г – 0.35 C-Cr-Mn-Si*, max

Таблица 6
Table 6

Количество микротрещин на обработанной поверхности после КПЭЭО
Number of microcracks on the machined surface after copy-piercing EDM

Режим КПЭЭО	Среднее количество микротрещин на 1 мм^2	
	40Х	35ХГС
Min	28,89	26,38
Max	72,35	66,35

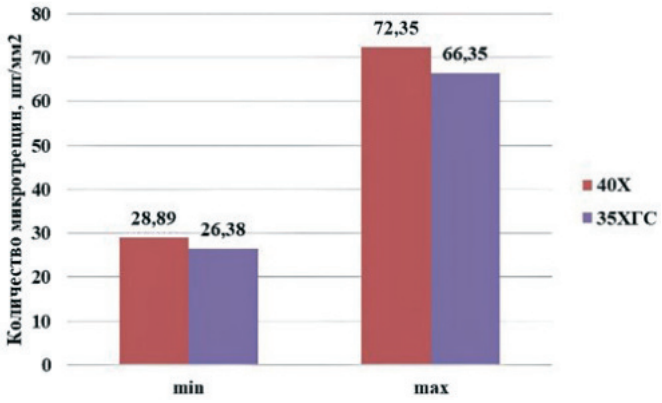


Рис. 8. Гистограмма количества микротрещин в белом слое

Fig. 8. Histogram of the number of microcracks in the white layer

Анализ гистограммы показал, что при КПЭЭО хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС количество образующихся микротрещин существенно изменяется в зависимости от параметров режима обработки. При обработке на максимальном режиме количество микротрещин более чем в 2 раза превышает их количество при обработке на минимальном режиме.

Установлено, что количество трещин в белом слое при обработке хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС сопоставимо, разница не превышает 10 %.

Выводы

1. Разработаны математические модели воздействия единичного импульса на обрабатываемую поверхность разряда в процессе КПЭЭО, позволяющие прогнозировать толщину белого слоя в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала. Отмечена возможность использования разработанной модели для прогнозирования размеров лунки и общей шероховатости поверхности. Получены теоретические значения толщины белого слоя для низколегированной стали 40Х и среднелегированной стали 35ХГС. Теоретические значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20…25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 60…80 мкм на максимальном режиме. При КПЭЭО на одинаковых режимах значения толщины белого слоя низколегированной стали 40Х больше значений для среднелегированной стали 35ХГС. Это можно обосновать большей теплопроводностью и меньшей температурой плавления стали 40Х.

2. Установлено, что экспериментальные значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20…25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 55…85 мкм на максимальном режиме. Показано, что полученные теоретические модели образования единичной лунки позволяют с заявленной точностью в зависимости от параметров обработки и физико-механических характеристик обрабатываемого материала спрогнозировать толщину образованного в процессе обработки белого слоя. Отклонения теоретических значений толщины белого слоя от экспериментальных составляют не более 5 %, что подтверждает правильность полученных моделей.

3. Установлено, что при КПЭЭО на минимальном режиме сплошность белого слоя в среднем в два раза больше, чем при обработке на минимальном режиме. Сплошность белого слоя стали 40Х выше в сравнении со сталью 35ХГС на 10 % при КПЭЭО на максимальном режиме и на 17 % при КПЭЭО на минимальном режиме.

4. Выявлено, что при обработке на максимальном режиме количество микротрещин более чем в 2 раза превышает их количество при обработке на минимальном режиме. Количество трещин в белом слое при обработке хромсодержащих сталей 40Х и 35ХГС сопоставимо, разница не превышает 10 %.

Список литературы

1. Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel / M. Hawryluk, M. Lachowicz, M. Zwierzchowski, M. Janik, Z. Gronostajski, J. Filipiak // Wear. – 2023. – Vol. 528–529. – DOI: 10.1016/j.wear.2023.204963.

2. Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels / J. Zeisig, N. Schädlich, L. Giebeler, J. Sander, J. Eckert, U. Kühn, J. Hufenbach // Wear. – 2017. – Vol. 382–383. – P. 107–112. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.04.021.

3. Mechanical properties and corrosion resistance of steel X210CrW12 after semi-solid processing and heat treatment / L. Rogal, J. Dutkiewicz, Z. Szklarz, H. Krawiec, M. Kot, S. Zimowski // Materials Characterization. – 2014. – Vol. 8823. – P. 100–110. – DOI: 10.3329/jname.v7i2.5309.

4. A comparative study on the erosion behavior and mechanism of chrome-coated 25Cr3Mo2WNiV steel and QPQ 25Cr3Mo2WNiV steel / C. Dou, K. Pan, C. Wang, S. Wei, C. Zhang, L. Xu, H. Cui, Y. Liang, J. Huang // Materials Today Communications. – 2024. – Vol. 41. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110820.

5. *Abbas M.N., Solomon D.G., Bahari Md.* A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47 (7). – P. 1214–1228. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.

6. *Liao Y.S., Chen S.T., Lin C.S.* Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2005. – Vol. 15. – P. 245–253. – DOI: 10.1088/0960-1317/15/2/001.

7. *Yoo H.K., Kwon W.T., Kang S.* Development of a new electrode for micro-electrical discharge machining (EDM) using Ti(C, N)-based cermet // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2014. – Vol. 15 (4). – P. 609–616. – DOI: 10.1007/s12541-014-0378-x.

8. *Hoang K.T., Yang S.H.* A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213 (9). – P. 1616–1622. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.025.

9. *Hoang K.T., Yang S.H.* A new approach for micro-WEDM control based on real-time estimation of material removal rate // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2015. – Vol. 16 (2). – P. 241–246. – DOI: 10.1007/s12541-015-0032-2.

10. *Debroy A., Chakraborty S.* Non-conventional optimization techniques in optimizing non-traditional machining processes: a review // Management Science Letters. – 2013. – Vol. 4 (1). – P. 23–38. – DOI: 10.5267/j.msl.2012.10.038.

11. *Świercz R., Oniszczuk-Świercz D., Chmielewski T.* Multi-response optimization of electrical discharge machining using the desirability function // Micromachines. – 2019. – Vol. 10 (72). – DOI: 10.3390/mi10010072.

12. *Świercz R., Oniszczuk-Świercz D.* The effects of reduced graphene oxide flakes in the dielectric on electrical discharge machining // Nanomaterials. – 2019. – Vol. 9 (3). – DOI: 10.3390/nano9030335.

13. *Chalisgaonkar R., Kumar J.* Microstructural characteristics of pure titanium by WEDM // International Journal of Microstructure and Materials Properties. – 2014. – Vol. 9 (6). – P. 463–484. – DOI: 10.1504/IJMMP.2014.067308.

14. Study of micro structural material changes after WEDM based on TEM lamella analysis / K. Mouralova, R. Zahradnicek, L. Benes, T. Prokes, R. Hrdy, J. Fries // Metals. – 2020. – Vol. 10 (7). – P. 949. – DOI: 10.3390/met10070949.

15. Determination of residual stress distribution in high strength aluminum alloy after EDM / S. Mehmood, A. Sultan, N.A. Anjum, W. Anwar, Z. Butt // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2017. – Vol. 11 (1). – P. 29–35. – DOI: 10.12913/22998624/68729.

16. *Ablyaz T.R., Zhurin A.V., Shlykov E.S.* Simulation of electrical discharge machining of dissimilar materials // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13 (6). – P. 2173–2177.

17. Discharge current effect on machining characteristics and mechanical properties of aluminum alloy 6061 workpiece produced by electric discharging machining process / C.-G. Kuo, C.-Y. Hsu, J.-H. Chen, P.-W. Lee // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9 (11). – P. 1–8. – DOI: 10.1177/1687814017730756.

18. *Ghodsiyeh D., Golshan A.J., Shirvanehdeh A.* Review on current research trends in wire electrical discharge machining (WEDM) // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 6 (2). – P. 154–166. – DOI: 10.17485/ijst/2013/v6i2.18.

19. Experimental investigation of white layer thickness on EDM processed silicon steel using ANFIS approach / T. Muthuramalingam, D. Saravanakumar, L.G. Babu, H.P. Nguen, N.P. Vu // Silicon. – 2020. – Vol. 12. – P. 1905–1911. – DOI: 10.1007/s12633-019-00287-2.

20. The effect of power supply current on recast layer in S45C steel using wire EDM / H. Wijaya, S. Wahyudi, R. Soenoko, P.H. Setyarini, S. Yasid, F. Gapsari // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 494 (1). – DOI: 10.1088/1757-899X/494/1/012102.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

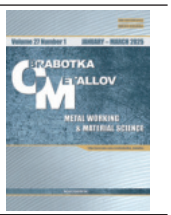
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 48–60
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-48-60

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Prediction of changes in the surface layer during copy-piercing electrical discharge machining

Timur Ablyaz [a], ***Ilya Osinnikov*** [b], ***Evgeniy Shlykov*** [c, *], ***Anna Kamenskikh*** [d], ***Aleksandr Gorohov*** [e], ***Nikita Kropanev*** [f], ***Karim Muratov*** [g]

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/0009-0006-4478-3803, ilyuhaosinnikov@bk.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-8076-0509, Kruspert@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-3012-2418, anna_kamenskih@mail.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0000-5588-0154, littlealex99@mail.ru; [f] https://orcid.org/0009-0002-5907-9852, cropanew.nikita2016@yandex.ru;
[g] https://orcid.org/0000-0001-7612-8025, Karimur_80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 13 December 2024
Revised: 19 December 2024
Accepted: 28 December 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Copy-piercing electrical discharge machining
Mathematical model
Chromium steel
Crater formation
Metallography
White layer
Continuity

Funding
The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01224, https://rscf.ru/project/23-79-01224/.

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the results of theoretical and experimental studies of the thickness, continuity and number of defects in the white layer formed during the copy-piercing electrical discharge machining, using low-alloy steel *0.4 C-Cr* and medium-alloy steel *0.35 C-Cr-Mn-Si* as an example. **The purpose of the work** is to theoretically and experimentally investigate the defective surface layer formed during copy-piercing electrical discharge machining. **Research methods.** Mathematical models of a single discharge pulse impact on the surface being machined were obtained using the finite element method. An *Electronica Smart CNC* copy-piercing electrical discharge machine was selected as the equipment for copy-piercing electrical discharge machining of samples made from *0.4 C-Cr* and *0.35 C-Cr-Mn-Si* steels. Simulating and experiments were carried out in two modes. The operating parameters were: pulse-on time (T_{on}, μs), voltage (***U***, V), and current (***I***, A). Metallographic studies were performed using an *OLYMPUS GX 51* optical microscope. **Results and discussion.** Mathematical models were developed to simulate the impact of a single discharge pulse on the machined surface during copy-piercing electrical discharge machining. These models allow predicting the thickness of the white layer depending on the processing modes and the properties of the material being processed. The theoretical values of the white layer thickness vary in the range of 20–25 μm during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode and vary in the range of 60–80 μm in the maximum mode. It was established that the experimental values of the white layer thickness vary in the range of 20–25 μm during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode and vary in the range of 55–85 μm in the maximum mode. The deviation of the theoretical values of the white layer thickness from the experimental ones differs by no more than 5 %, which confirms the accuracy of the obtained models. It was found that during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode, the continuity of the white layer is on average two times greater than when machining in the maximum mode. The continuity of the white layer of *0.4 C-Cr* steel is 10 % higher compared to *0.35 C-Cr-Mn-Si* steel during copy-piercing electrical discharge machining in the maximum mode and 17 % higher during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode. It was revealed that when machining in the maximum mode, the number of microcracks is more than 2 times greater than when machining in the minimum mode. The number of cracks in the white layer when processing chromium steels *0.4 C-Cr* and *0.35 C-Cr-Mn-Si* is comparable, the difference does not exceed 10 %.

For citation: Ablyaz T.R., Osinnikov I.V., Shlykov E.S., Kamenskikh A.A., Gorohov A.Yu., Kropanev N.A., Muratov K.R. Prediction of changes in the surface layer during copy-piercing electrical discharge machining. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 48–60. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-48-60. (In Russian).

References

1. Hawryluk M., Lachowicz M., Zwierzchowski M., Janik M., Gronostajski Z., Filipiak J. Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel. *Wear*, 2023, vol. 528–529. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204963.

*** Corresponding author**
Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky prospect,
614990, Perm, Russian Federation
Tel.: +7 961 759-88-49, **e-mail**: Kruspert@mail.ru

2. Zeisig J., Schädlich N., Giebeler L., Sander J., Eckert J., Kühn U., Hufenbach J. Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels. *Wear*, 2017, vol. 382–383, pp. 107–112. DOI: 10.1016/j.wear.2017.04.021.

3. Rogal L., Dutkiewicz J., Szklarz Z., Krawiec H., Kot M., Zimowski S. Mechanical properties and corrosion resistance of steel X210CrW12 after semi-solid processing and heat treatment. *Materials Characterization*, 2014, vol. 8823, pp. 100–110. DOI: 10.3329/jname.v7i2.5309.

4. Dou C., Pan K., Wang C., Wei S., Zhang C., Xu L., Cui H., Liang Y., Huang J. A comparative study on the erosion behavior and mechanism of chrome-coated 25Cr3Mo2WNiV steel and QPQ 25Cr3Mo2WNiV steel. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 41. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110820.

5. Abbas M.N., Solomon D.G., Bahari Md. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47 (7), pp. 1214–1228. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.

6. Liao Y.S., Chen S.T., Lin C.S. Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2005. – Vol. 15. – P. 245–253. – DOI: 10.1088/0960-1317/15/2/001.

7. Yoo H.K., Kwon W.T., Kang S. Development of a new electrode for micro-electrical discharge machining (EDM) using Ti(C, N)-based cermet. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, vol. 15 (4), pp. 609–616. DOI: 10.1007/s12541-014-0378-x.

8. Hoang K.T., Yang S.H. A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213 (9), pp. 1616–1622. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.025.

9. Hoang K.T., Yang S.H. A new approach for micro-WEDM control based on real-time estimation of material removal rate. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, vol. 16 (2), pp. 241–246. DOI: 10.1007/s12541-015-0032-2.

10. Debroy A., Chakraborty S. Non-conventional optimization techniques in optimizing non-traditional machining processes: a review. *Management Science Letters*, 2013, vol. 4 (1), pp. 23–38. DOI: 10.5267/j.msl.2012.10.038.

11. Świercz R., Oniszczuk-Świercz D., Chmielewski T. Multi-response optimization of electrical discharge machining using the desirability function. *Micromachines*, 2019, vol. 10 (72). DOI: 10.3390/mi10010072.

12. Świercz R., Oniszczuk-Świercz D. The effects of reduced graphene oxide flakes in the dielectric on electrical discharge machining. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9 (3). DOI: 10.3390/nano9030335.

13. Chalisgaonkar R., Kumar J. Microstructural characteristics of pure titanium by WEDM. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2014, vol. 9 (6), pp. 463–484. DOI: 10.1504/IJMMP.2014.067308.

14. Mouralova K., Zahradnicek R., Benes L., Prokes T., Hrdy R., Fries J. Study of micro structural material changes after WEDM based on TEM lamella analysis. *Metals*, 2020, vol. 10 (7), p. 949. DOI: 10.3390/met10070949.

15. Mehmood S., Sultan A., Anjum N.A., Anwar W., Butt Z. Determination of residual stress distribution in high strength aluminum alloy after EDM. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2017, vol. 11 (1), pp. 29–35. DOI: 10.12913/22998624/68729.

16. Ablyaz T.R., Zhurin A.V., Shlykov E.S. Simulation of electrical discharge machining of dissimilar materials. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13 (6), pp. 2173–2177.

17. Kuo C.-G., Hsu C.-Y., Chen J.-H., Lee P.-W. Discharge current effect on machining characteristics and mechanical properties of aluminum alloy 6061 workpiece produced by electric discharging machining process. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9 (11), pp. 1–8. DOI: 10.1177/1687814017730756.

18. Ghodsiyeh D., Golshan A.J., Shirvanehdeh A. Review on current research trends in wire electrical discharge machining (WEDM). *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6 (2), pp. 154–166. DOI: 10.17485/ijst/2013/v6i2.18.

19. Muthuramalingam T., Saravanakumar D., Babu L.G., Nguen H.P., Vu N.P. Experimental investigation of white layer thickness on EDM processed silicon steel using ANFIS approach. *Silicon*, 2020, vol. 12, pp. 1905–1911. DOI: 10.1007/s12633-019-00287-2.

20. Wijaya H., Wahyudi S., Soenoko R., Setyarini P.H., Yasid S., Gapsari F. The effect of power supply current on recast layer in S45C steel using wire EDM. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 494 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/494/1/012102.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

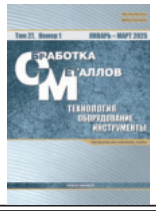
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 61–76
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-61-76

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Фрезерование заготовок из инконеля 625, полученных с помощью электродуговой наплавки

Никита Мартюшев [1, a, *], ***Виктор Козлов*** [1, b], ***Александр Болтрушевич*** [1, c], ***Юлия Кузнецова*** [2, d], ***Александр Бовкун*** [3, e]

[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
[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация

[a] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-9351-5713, kozlov-viktor@bk.ru;
[c] https://orcid.org/0009-0004-0265-1680, aeb20@tpu.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-1388-6125, julx@bk.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-0623-4284, Bovas87@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.757.048.6:621.791.047.7:669.245

История статьи:
Поступила: 10 декабря 2024
Рецензирование: 30 декабря 2024
Принята к печати: 23 января 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Инконель 625
Электродуговая наплавка (WAAM)
Фрезерование
Силы резания
Режимы резания
Твердость
Износ инструмента

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивные технологии, в частности печать проволокой, набирают все большую популярность в последнее время. Этот метод позволяет получать заготовки с существенно повышенной твердостью по сравнению с традиционными методами, такими как ковка, что, в свою очередь, значительно увеличивает силу резания при последующей обработке. Настоящее исследование направлено на изучение сил резания при фрезеровании образцов из высокопрочного жаростойкого сплава инконель 625, полученных методом электродуговой наплавки. **Целью работы** является исследование влияния микроструктуры и свойств инконеля 625, полученного методом электродуговой наплавки, на силы резания при фрезеровании. Особое внимание уделено поиску оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимизацию сил резания и вибраций в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь». **Методы исследования.** Образцы изготавливались методом электродуговой наплавки проволоки из жаропрочного никелевого сплава инконель 625. В работе проведен комплексный анализ микроструктуры полученных образцов с использованием современных методов материаловедения. Основное внимание уделено экспериментальному исследованию сил резания при фрезеровании с использованием различных режимов обработки (скорости резания, подачи, глубины резания) и типов фрез. **Результаты и обсуждение.** Микроструктура образцов инконеля 625, полученных электродуговой наплавкой, детально охарактеризована. Определены оптимальные режимы фрезерования, обеспечивающие эффективную обработку материала с учетом его высокой твердости и прочности. Ожидается, что для обработки заготовок из инконеля 625 потребуются высокопрочные твердосплавные фрезы, возможно, специальной геометрии и с повышенной износостойкостью, большего диаметра, чем в случае стали 40Х13. Результаты исследования позволят разработать рекомендации по выбору оптимальных режимов резания, минимизирующих силу резания, температуру режущей кромки, износ инструмента и вибрации в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», что повысит производительность и точность обработки.

Для цитирования: Фрезерование заготовок из инконеля 625, полученных с помощью электродуговой наплавки / Н.В. Мартюшев, В.Н. Козлов, А.Е. Болтрушевич, Ю.С. Кузнецова, А.С. Бовкун // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 61–76. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-61-76.

Введение

Современное развитие науки и техники стимулирует активное внедрение инновационных технологий в различных областях, в том числе и в производстве металлических деталей. Аддитивные технологии, несмотря на значительный потенциал, до сих пор сталкиваются с проблемами низкой производительности и высокой стоимости. Стремление к оптимизации этих процес-

***Адрес для переписки**
Мартюшев Никита Владимирович, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30,
634050, г. Томск, Россия
Тел.: +7 3822 60-62-85, **e-mail:** martjushev@tpu.ru

сов привело к развитию методов аддитивного производства, основанных на наплавке металлической проволоки [1–3].

Указанный подход в сравнении с использованием порошковых материалов существенно сокращает время изготовления и снижает себестоимость заготовок благодаря более низкой цене проволоки. Однако метод наплавки проволокой часто приводит к недостаточному качеству поверхности, требующей дополнительной механической обработки. Кроме того, специфические условия охлаждения в процессе наплавки приводят к образованию микроструктуры с повышенной твердостью по сравнению с традиционными методами производства, такими как ковка или литье. Это особенно актуально при использовании жаропрочных материалов [4, 5]. Для демонстрации преимуществ и недостатков метода наплавки рассмотрим высокопрочный жаростойкий сплав – инконель 625. Его высокая стоимость и специфические свойства позволяют продемонстрировать преимущества и недостатки данного метода. Высокая твердость, достигаемая при наплавке инконеля 625, определяет необходимость применения специализированных методов механической обработки, направленных на оптимизацию процессов и минимизацию затрат [6–8].

В процессе послойной наплавки каждый новый слой наносится на предыдущий, который в свою очередь подвергается повторному нагреву и быстрому охлаждению [9]. Этот цикл нагрева и охлаждения оказывает значительное влияние на формирование микроструктуры. В случае использования мартенситных сталей относительно низкая критическая скорость охлаждения способствует образованию мартенситной структуры с высокой твердостью, что подтверждено исследованиями [10, 11]. Однако при использовании метода селективного лазерного плавления (SLM) или электродуговой наплавки (WAAM) с инконелем ситуация усложняется. Из-за высоких температур плавления и сложных фазовых превращений возникает анизотропия механических свойств готовой детали. Величина зерна, пористость и соответственно прочностные характеристики зависят от направления измерения, как показано в работах [12, 13]. Это связано с неоднородностью термического цикла в процессе послойного наращивания. Работа [14] демонстрирует анизотропию механических свойств изделий, изготовленных аддитивными методами, а работа [15] указывает на возможность частичной компенсации этого эффекта путем термообработки, что, однако, увеличивает затраты на производство. Кроме того, быстрое охлаждение при SLM или WAAM может приводить к образованию на поверхности заготовок из жаропрочных сплавов упрочненного поверхностного слоя с крайне высокой твердостью, что существенно осложняет последующую механическую обработку. Для инконеля этот эффект может быть еще более выраженным из-за его уникальных свойств и более высокой температуры плавления.

Параметры процесса электродуговой наплавки, такие как температура подложки, скорость и траектория движения горелки [16, 17], существенно влияют на формирование микроструктуры и, как следствие, на механические свойства получаемой заготовки. Даже при оптимизации этих параметров неизбежно возникают структурные дефекты, такие как локальное упрочнение поверхности, неоднородность распределения фаз и микропор, что снижает предсказуемость механических свойств. WAAM как один из методов аддитивного производства характеризуется образованием анизотропной микроструктуры с неравномерным распределением напряжений и свойств по объему детали [18–20]. Это обусловлено послойным характером процесса наплавки, неравномерностью нагрева и охлаждения, а также внутренними напряжениями, возникающими в процессе кристаллизации расплава.

Помимо неоднородности структуры технология WAAM часто приводит к образованию заготовок с низким качеством поверхности, требующей обязательной последующей механической обработки [21–23]. Это связано с неравномерностью наплавки, образованием наплывов, пористостью и другими дефектами поверхности. Необходимость дополнительной обработки значительно увеличивает общую стоимость производства и время изготовления детали. Для жаропрочных сплавов, обладающих высокой прочностью и твердостью, этот недостаток особенно актуален, так как обработка таких материалов требует применения высокопрочного инструмента и оптимизированных режимов резания, что еще больше усложняет процесс и повышает его стоимость [24, 25].

Сложные термические циклы, присущие технологии WAAM, приводят к образованию неоднородной микроструктуры в получаемых заготовках, что существенно осложняет последующую механическую обработку. Эта неоднородность проявляется в значительных вариациях твердости, прочности и других механических свойств по объему детали, особенно ярко выраженных при использовании жаропрочных сплавов. В работе [26] показано, что фрезерование образцов сплава Ti6Al4V, изготовленных методом WAAM, приводит к значительному износу инструмента (например, концевой фрезы из Al2O3/Si3N4, сиалона) по сравнению с обработкой кованых или литых образцов. Эта повышенная абразивность обусловлена как неоднородностью микроструктуры, так и наличием остаточных напряжений, возникающих в процессе наплавки. Повышенная твердость отдельных зон, микротрещины и неравномерность распределения фаз способствуют быстрому изнашиванию режущего инструмента. Для снижения износа и повышения стойкости инструмента при обработке жаропрочных сплавов, полученных методом WAAM, можно использовать несколько стратегий [27, 28]. К ним относятся оптимизация режимов резания (скорости резания, подачи, глубины резания), применение современных высокопрочных и износостойких инструментальных материалов, а также использование эффективных систем охлаждения, например криогенного охлаждения. Выбор оптимальной стратегии зависит от конкретного жаропрочного сплава, требуемого качества обработки и экономических соображений. Необходимо учитывать, что для жаропрочных сплавов, отличающихся высокой твердостью и прочностью, повышенная стойкость инструмента является критическим фактором, влияющим на производительность и экономическую эффективность процесса механической обработки [29].

Один из подходов к снижению износа инструмента при обработке деталей, изготовленных методом WAAM, заключается в оптимизации параметров процесса наплавки для получения требуемых поверхностных свойств. Контролируя параметры процесса (скорость наплавки, параметры электрической дуги, температуру подложки и др.), можно влиять на формирование микроструктуры и, следовательно, на твердость и абразивность поверхности. Это особенно актуально для жаропрочных сплавов, где неоднородность структуры определяет интенсивность износа инструмента. Для количественного анализа неоднородности микротвердости в заготовках из жаропрочных сплавов, полученных методом WAAM, были разработаны и применены специальные методики агрегирования данных, позволяющие оценивать средние значения твердости и ее вариации в различных зонах детали [30]. Такой подход позволяет более точно предсказывать износ инструмента и оптимизировать режимы обработки.

Использование комбинированных методов аддитивного производства, сочетающих различные технологии наплавки или добавляющие промежуточные стадии обработки, может способствовать получению более однородной структуры и, следовательно, улучшению обрабатываемости жаропрочных сплавов. Однако, несмотря на эти усилия, исследования [31] показывают, что обработка заготовок из жаропрочных сплавов, изготовленных методами аддитивного производства (WAAM, SLM и др.), часто сопровождается увеличением сил резания по сравнению с обработкой деталей, полученных традиционными методами (ковка, литье). Это объясняется не только неоднородностью структуры, но и наличием остаточных напряжений, микропор и других дефектов, характерных для аддитивных технологий. Работа [31] подтверждает высокую вариабельность сил резания при обработке WAAM-заготовок даже при использовании одинаковых режимов обработки, что подчеркивает важность индивидуального подбора параметров резания для каждой конкретной детали.

Исследований, посвященных субтрактивной обработке деталей, изготовленных методом электродуговой наплавки (WAAM), крайне мало. Это обусловлено рядом факторов, включая сложность предсказания свойств материала после наплавки и необходимость применения специфических методов обработки, учитывающих особенности микроструктуры. В частности, использование WAAM для создания заготовок из жаропрочных и коррозионно-стойких сплавов, таких как инконель 625, сопряжено с дополнительными трудностями, связанными с высокой твердостью и прочностью материала. Поэтому разработка и оптимизация

режимов обработки заготовок из инконеля 625, полученных методом WAAM, представляют собой актуальную задачу, требующую комплексного подхода. Необходимость определения оптимальных параметров резания для минимизации износа инструмента, повышения производительности и обеспечения требуемого качества поверхности делает данную тему особенно значимой для развития аддитивных технологий и их промышленного применения.

***Цель этой работы*:** с помощью проведенных исследований определить режимы фрезерования заготовок из инконеля 625, изготовленных электродуговой наплавкой (WAAM).

Материалы и методики

Для проведения исследования сил резания, которые возникают при обработке заготовок из инконеля 625, изготовленных методом электродуговой наплавки (WAAM), было напечатано пять образцов. Геометрические размеры каждого образца составляли 25 мм (высота) × 75 мм (ширина) × 25 мм (длина). Эта форма и размеры выбраны для обеспечения достаточной жесткости образцов при фрезеровании и минимизации влияния зажимов на результаты эксперимента. Применение стандартных размеров позволяет сравнивать результаты с данными других исследований.

Образцы были изготовлены методом WAAM с использованием проволоки из инконеля 625 (состав сплава приведен в таблице). Выбор инконеля 625 обусловлен его широким применением в высокотемпературных условиях и сложной микроструктурой, что позволяет исследовать влияние WAAM-процесса на механические свойства и обрабатываемость материала. Для обеспечения воспроизводимости результатов процесс наплавки проводился с использованием строго контролируемых параметров (скорости наплавки, напряжения дуги, расхода защитного газа и др.), оптимизированных для получения минимального количества дефектов и максимально однородной микроструктуры. Эти параметры будут подробно описаны в соответствующем разделе исследования.

Изготовление образцов с помощью электродуговой наплавки

Образцы были напечатаны на установке электродуговой наплавки проволокой. Данное оборудование разработано и изготовлено в Томском политехническом университете. Изготовление образцов из инконеля методом WAAM осуществлялось по следующей технологии. Сначала создавалась компьютерная 3D-модель с использованием CAD-системы. Затем эта модель разбивалась на отдельные слои, каждый из которых предстояло наплавить.

Процесс послойного наплавления осуществлялся на 3D-принтере с использованием заданных параметров: сила тока составляла 115…135 А, напряжение – 21…24 В, скорость наплавки – 300 мм/мин. В качестве источника питания применялся инверторный выпрямитель, что обеспечивает высокую стабильность процесса и контроль параметров наплавки. Наплавка происходила на подвижном столе, обеспечивающем точное позиционирование по осям X и Y, что гарантирует точное воспроизведение геометрических параметров модели. Позиционирование наплавляемой горелки по оси Z контролировалось для точного и однородного наплавления слоев. Плавление проволоки и подплавление подложки (или предыдущего слоя) происходило с помощью управляемой траектории перемещения горелки, что гарантирует точное наплавление и минимальное отклонение от модели. Толщина наплавляемого слоя варьировалась от 2 до 5 мм в зависимости от выбранных режимов наплавки и требуемой точности. Указанные режимы наплавки были оптимизированы для достижения желаемого качества и минимального количества дефектов, чтобы получить пригодные образцы для последующих этапов исследования.

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

При печати в качестве материала подложки использовался тот же материал, что и для проволоки, – жаропрочный никелевый сплав. Печать осуществлялась в среде защитного газа аргона.

Исследование микроструктуры и твердости полученных образцов

Для выявления микроструктурных особенностей образцов инконеля 625, изготовленных методом электродуговой наплавки, было проведено химическое травление. Процесс травления осуществлялся путем погружения образцов в специально подготовленный травильный раствор на протяжении 8 минут. Раствор представлял собой смесь из соляной кислоты (10 мл), плавиковой кислоты (10 мл) и этилового спирта (100 мл). Выбор именно этого состава травителя обусловлен его эффективностью в раскрытии микроструктурных деталей никелевых сплавов, таких как инконель 625, для обеспечения достаточного контраста между различными фазами и границами зерен. После травления образцы были тщательно промыты дистиллированной водой и высушены сжатым воздухом для предотвращения коррозии и обеспечения высокой точности анализа. Полученные после травления образцы исследовались с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss AxioMAT, обеспечивающего высокое разрешение и точность измерений. Применение данного микроскопа позволило получить детальные изображения микроструктуры, включая анализ размера и формы зерен, выявление дендритной структуры, определение наличия вторичных фаз и других структурных неоднородностей, которые напрямую связаны с параметрами процесса электродуговой наплавки и влияют на механические свойства материала. Полученные микрофотографии были использованы для количественного анализа микроструктуры, включая измерение размера зерен, определение степени дендритности и оценку объемной доли вторичных фаз.

Исследование сил резания при фрезеровании

Экспериментальное исследование фрезерования проводилось на высокоточном обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) модели CONCEPTMill 155 производства компании EMCO. Выбор данной модели обусловлен ее высокой жесткостью, точностью позиционирования и возможностью проведения контролируемых экспериментов. Для точного измерения сил резания в процессе фрезерования использовался высокочувствительный шестикомпонентный динамометрический датчик Kistler 9257B (Швейцария), обладающий высокой чувствительностью (7,5 Н) и низкой погрешностью измерения (±0,005 %), что обеспечивало достоверность полученных данных. Обработка и анализ экспериментальных данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения DynoWare, позволяющего проводить комплексный анализ сил резания, выявлять их динамические характеристики и учитывать влияние различных параметров обработки. Общий разброс результатов измерений сил резания не превышал 15 %, что обусловлено прежде всего сложностью точной настройки параметров фрезерования (ширины и глубины резания) и неизбежным износом режущего инструмента в процессе многократных экспериментов.

В качестве режущего инструмента была выбрана твердосплавная концевая фреза диаметром 8 мм, произведенная компанией МИОН. Данная фреза была выбрана из-за ее высокой прочности и износостойкости, необходимых для обработки высокопрочного и абразивного материала – инконеля 625. Твердосплавный материал фрезы состоит преимущественно из карбидов вольфрама, обеспечивающих высокую твердость и износостойкость режущей кромки, и кобальтовой связки (приблизительно 8 %), которая отвечает за прочность и связность карбидных зерен. Конструкция фрезы включала в себя четыре зуба, что обеспечивало достаточную интенсивность съема материала, но требовало тщательного контроля параметров резания для предотвращения перегрева и вибраций. Геометрия фрезы (угол заточки, передний и задний углы) была стандартной для данного типа инструмента и не подвергалась модификации для настоящего исследования. Выбор именно этого инструмента был обусловлен его доступностью, хорошо изученными характеристиками и подходящими для данного исследования параметрами. Угол винтовой канавки $\omega = 35°$, задний угол – 5°, передний угол – 7°. В экспериментах использовали сухое фрезерование.

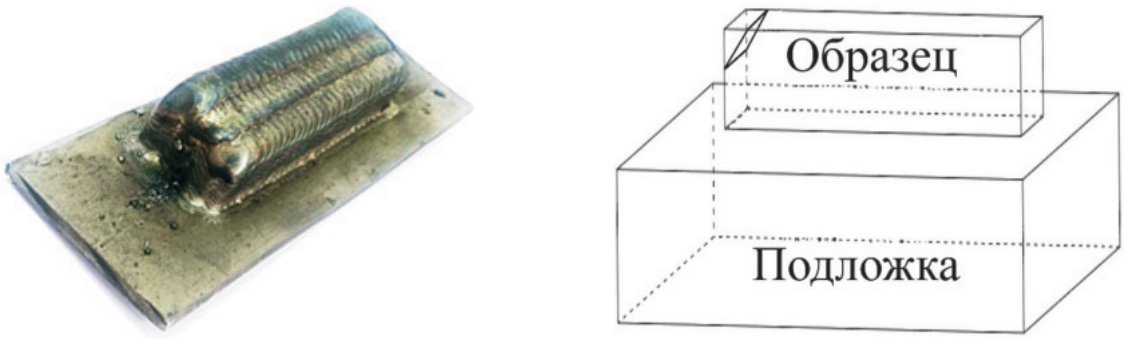
Результаты и их обсуждение

Получение образцов электродуговой наплавкой и исследование их микроструктуры

В первую очередь были получены образцы для проведения исследований. Было изготовлено пять образцов с помощью WAAM-технологии для проведения необходимого объема исследований. Фотография полученной заготовки и схема отбора образцов для металлографических исследований показаны на рис. 1.

Микроструктура образцов из инконеля 625, полученных методом электродуговой наплавки (WAAM), представлена на рис. 2. На микрофотографии, сделанной с помощью оптического микроскопа, в центре образца отчетливо видна удлиненная ячеистая структура. Характерной особенностью является наличие ярких включений (вероятно, вторичных фаз или частиц окислов) в межзеренных областях (между дендритами). Это указывает на сложность фазовых превращений и возможные неоднородности, возникающие в процессе наплавки. На изображении также хорошо различима дендритная структура. Дендриты, формирующиеся при затвердевании расплавленного инконеля, имеют заметные оси первого порядка, протяженные в одном направлении. Оси второго порядка, как правило, значительно менее выражены или отсутствуют, что указывает на специфику кристаллизации, вызванную процессами быстрой наплавки. Такая особенность микроструктуры связана с высокими скоростями охлаждения, характерными для WAAM. Кроме того, анализ микроструктуры свидетельствует о заметной текстуре в зернах. Наличие текстуры может указывать на предпочтительные направления роста кристаллитов, обусловленные направленным тепловым потоком и напряженным состоянием материала во время наплавки. Эти особенности текстуры и дендритной структуры существенно влияют на механические свойства готовых образцов из инконеля 625, полученных методом WAAM.

Различные скорости охлаждения, характерные для процесса электродуговой наплавки, приводят к образованию зерен различного размера в образцах из инконеля 625. Микроструктура характеризуется дендритным строением, где кристаллы вытянуты вдоль направления отвода тепла. Это направление совпадает с направлением наращивания слоев при WAAM. Наблюдается закономерность увеличения размеров зерен по мере удаления от подложки. В исследуемых образцах длина дендритов достигала 0,3…0,5 мм. Это согласуется с данными других исследователей, изучающих микроструктуру инконеля 625, полученного аддитивными методами. Например, в работе [6] при использовании селективного лазерного плавления (SLM) была отмечена длина зерен около 1 мм в образцах из инконеля 625. Различие в размерах зерен может быть объяснено разными скоростями охлаждения, характерными для WAAM и SLM. Результаты проведенных исследований также подтверждают данные работ [11, 16], где показано, что в нижней части образца инконеля 625 (ближе к подложке) пре-



а *б*

Рис. 1. Фотография напечатанной с помощью WAAM-технологии заготовки (*а*) и схема вырезания образца (*б*) для исследований

Fig. 1. Photograph of a printed workpiece (*a*) using *WAAM* technology and a diagram of the sample cutout (*б*) for research

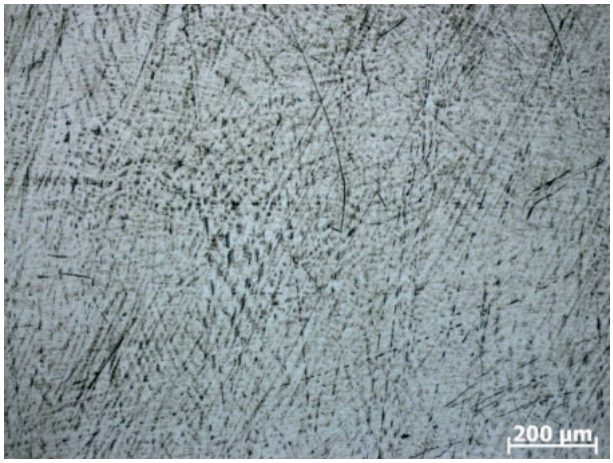


Рис. 2. Микроструктура образцов, полученных с помощью WAAM-технологии

Fig. 2. Microstructure of the samples obtained using *WAAM* technology

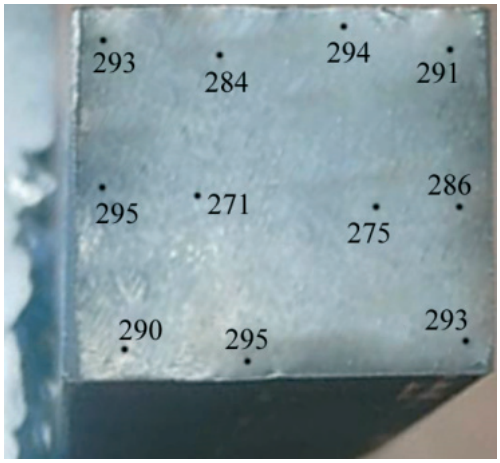


Рис. 3. Микротвердость образца, полученного с помощью WAAM-технологии

Fig. 3. Microhardness of the samples obtained using *WAAM* technology

обладают равноосные зерна. По мере удаления от подложки и нарастания новых слоев зерна вытягиваются вдоль направления теплоотвода, проявляется текстура, и их длина существенно увеличивается. Совпадение наблюдаемых закономерностей с результатами работ [11, 16] подтверждает результаты и позволяет сделать вывод о влиянии теплового потока и скорости охлаждения на формирование микроструктуры в образцах инконеля 625, полученных методом WAAM.

Микротвердость

Микротвердость заготовок определяли методом Виккерса при нагрузке 1 кгс с выдержкой 10 с как среднее значение двадцати отпечатков в разных местах.

Анализ результатов измерения микротвердости образцов показывает (рис. 3), что твердость в их центре меньше по сравнению с краями. Центральные области образца охлаждаются медленнее, чем периферийные. Внешние слои быстрее отдают тепло в окружающую среду, что приводит к более быстрому затвердеванию и образованию более мелкозернистой структуры с повышенной твердостью. Центральные же участки охлаждаются медленнее, что способствует росту более крупных зерен и, следовательно, снижению твердости. Это хорошо согласуется с полученными данными металлографического анализа. Такая структура будет оказывать влияние на режимы обработки заготовок и на возникающие при обработке силы резания.

Исследование сил резания при механической обработке образцов

Представленные ниже результаты экспериментального исследования фокусируются на анализе сил резания при фрезеровании образцов из инконеля 625, изготовленных методом электродуговой наплавки. Целью эксперимента было изучение влияния различных параметров резания на величину сил, возникающих при обработке материала, с учетом его высокой твердости и неоднородной микроструктуры, характерной для WAAM-технологии.

Для обеспечения контролируемых условий эксперимента в рассматриваемой серии экспериментов ширина фрезерования B была постоянной и составляла 2 мм. Это условие гарантировало, что при небольшой глубине фрезерования $t = 1$ мм в процессе резания одновременно участвует только один зуб, что позволяет получить графики изменения сил резания на одном зубе в процессе поворота зуба фрезы при вращении фрезы (рис. 5).

Наличие угла наклона винтовой линии главной режущей кромки зуба на периферии фрезы $\omega = 40^{\circ}$ (иногда используются символы β или ψ) также вынуждает уменьшить ширину фрезерования B. При увеличении ширины фрезерования в резание может начать вступать последующий зуб, хотя предыдущий еще не закончил резание. Этот фактор более важен для фрез небольшого диаметра ($d_{\text{фрезы}} < 12$ мм) и при увеличении глубины фрезерования $t > 0{,}4d_{\text{фрезы}}$.

В качестве основного варьируемого параметра резания в рассматриваемой серии экспериментов была выбрана минутная подача $f_{мин}$, в то время как другие параметры резания (глубина резания t и скорость резания V) были постоянными. Такой подход позволил оценить влияние минутной подачи на величину сил резания изолированно от других факторов.

Экспериментальные данные о силах резания были обработаны с использованием метода наименьших квадратов для аппроксимации эмпирических зависимостей. Это позволило получить аналитические выражения, описывающие зависимость сил резания от минутной подачи. Для наглядного представления результатов эксперимента были построены графики, на которых отображены максимальные значения сил резания в каждом цикле обработки (рис. 4). Использование максимальных значений сил резания позволяет избежать искажения общей картины влияния параметра $f_{мин}$ из-за колебаний сил, которые неизбежно возникают в процессе фрезерования по причине изменения толщины среза на зубе при вращении фрезы, неизбежного наличия небольшого радиального биения зубьев при изготовлении фрезы и ее закреплении в цанговом патроне, неравномерности структуры обрабатываемого материала и небольших вибраций в системе «станок – инструмент – заготовка». Такой подход позволяет получить более обобщенные и надежные результаты, отражающие общую тенденцию изменения сил резания в зависимости от минутной подачи, тем более что на разрушение зуба фрезы влияет наибольшая сила на каком-либо зубе.

Графики изменения силы подачи P_h (направление силы P_h действует вдоль вектора направления подачи стола), боковой силы P_v (направление силы P_v перпендикулярно направлению вектора подачи) и осевой силы P_x (действует вдоль оси фрезы, т. е. при концевом фрезеровании – вертикально) при изменении минутной подачи $f_{мин}$ показаны на рис. 4. При направлении подачи поперек образца наибольшие силы Ph_{max} и Pv_{max} больше, и их увеличение при росте подачи происходит более интенсивно, т. е. имеется влияние направления синтеза при использовании аддитивных технологий. Осевая сила Px_{max} практически не изменяется при увеличении подачи, но и она немного больше при подаче поперек образца.

На рис. 4 график *2* ($Pv_{max\ вдоль}$) имеет перегиб при подаче $f_{мин}$ = 80 мм/мин, но это явление не

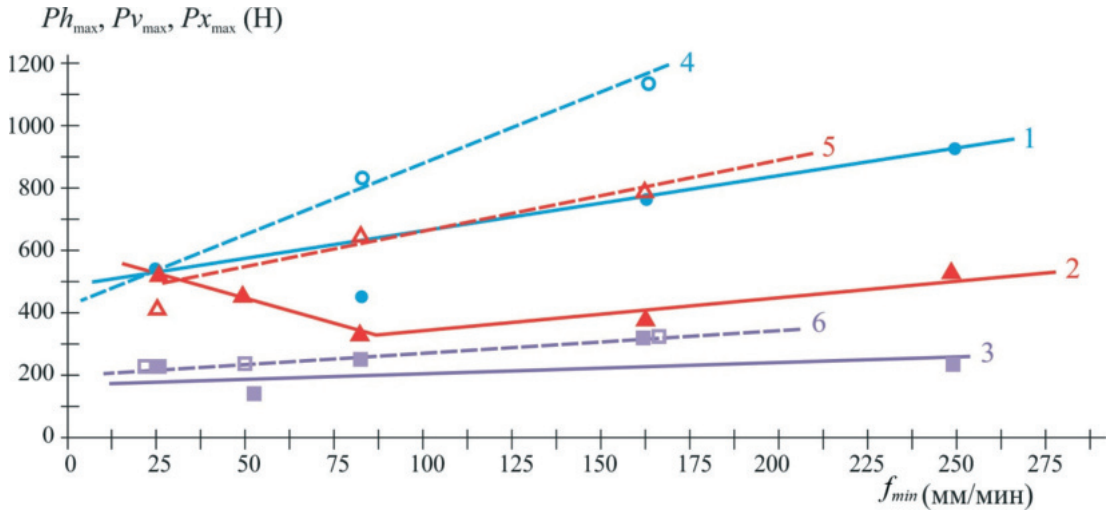


Рис. 4. График изменения наибольших значений сил резания P_h, P_v и P_x (Н) в зависимости от подачи $f_{мин}$, мм/мин (ширина фрезерования B = 2 мм, скорость резания V = 15,8 м/мин, глубина фрезерования t = 1 мм).

Подача вдоль образца: *1* – Ph_{max}, *2* – Pv_{max}, *3* – Px_{max}; подача поперек образца: *4* – Ph_{max}, *5* – Pv_{max}, *6* – Px_{max}

Fig. 4. Graph of the change in the highest values of cutting forces P_h, P_v and P_x (N) depending on the feed rate f_{min} (mm/min) (B = 2 mm, V = 15,8 m/min, t = 1 mm).

Feed along the sample: *1* – Ph_{max}, *2* – Pv_{max}, *3* – Px_{max}; feed across the sample: *4* – Ph_{max}, *5* – Pv_{max}, *6* – Px_{max}

наблюдается при подаче поперек образца – график *5* ($Pv_{\text{max поперёк}}$). При подаче $f_{\text{мин}}$ = 80 мм/мин наблюдается уменьшение силы подачи $Ph_{\text{max вдоль}}$ (график *1*), но остальные точки этой силы располагаются на прямой линии.

Анализ графиков сил резания, показнных на рис. 4, демонстрирует характерные силовые взаимодействия между фрезой и заготовкой. Вектор силы P_v измеряется динамометром с отрицательным значеним. Это указывает на то, что эта составляющая силы, обусловленная радиальным воздействием зубьев фрезы, направлена от оператора, т. е. противоположно направлению оси *OY*. Для удобства визуализации на рисунке вектор Pv_{max} показан в положительном направлении оси, хотя его фактическое направление противоположно. Аналогично сила P_x, также имеющая отрицательное значение, направлена против оси *OZ*. Это следствие положительного угла наклона винтовой канавки ω фрезы, что приводит к вертикальному подтягиванию заготовки. Важно отметить, что при анализе величин сил P_v и P_x учитываются их абсолютные значения, поскольку именно они отражают интенсивность силового воздействия. В то же время сила P_h имеет положительное значение, что соответствует направлению оси *OX*, определяющему основное усилие резания.

Анализ графиков максимальных значений сил резания Ph_{max} и Pv_{max} в зависимости от минимальной минутной подачи $f_{\text{мин}}$ (см. рис. 4) при глубине резания 3 мм и прочих постоянных параметрах резания демонстрирует их приблизительно линейную взаимосвязь. Это позволяет использовать линейные уравнения для аппроксимации этих зависимостей в рассматриваемом диапазоне параметров. Наблюдается закономерность: при синтезе заготовок и направлении подачи вдоль оси обработки величины максимальных сил Ph_{max}, Pv_{max} и Px_{max} незначительно меньше, чем при перпендикулярном направлении подачи. Это различие, как видно из рис. 4, не является значительным, но показывает влияние направления подачи на силовые характеристики процесса фрезерования. Разница в силовых показателях может быть обусловлена изменением условий контакта инструмента с заготовкой, в частности изменением площади контакта режущей кромки и глубины врезания в зависимости от направления подачи. Дополнительные исследования, включающие анализ угла наклона зубьев фрезы, геометрии режущей кромки и свойств обрабатываемого материала, необходимы для более точного объяснения этого явления. Более того, некоторые факторы, такие как наличие вибраций и влияние смазочно-охлаждающей жидкости, также могут вносить свой вклад в наблюдаемые различия. Более точная модель, учитывающая все эти факторы, позволит точнее прогнозировать силовые характеристики и оптимизировать технологический процесс.

Рис. 5 демонстрирует неожиданное явление при фрезеровании 4-зубным инструментом при глубине резания 3 мм. Несмотря на теоретическое предположение о контакте только одного зуба с заготовкой в каждый момент времени, что

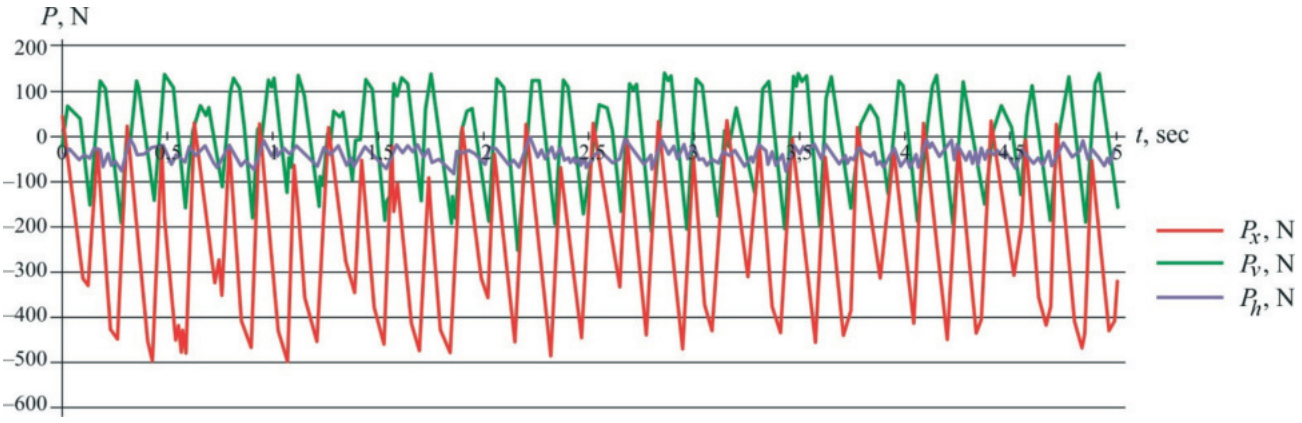


Рис. 5. Пример графика изменения составляющих силы от времени резания в процессе фрезерования вдоль направления выращивания (B = 2 мм, V = 16 м/мин, t = 3 мм, $f_{\text{мин}}$ = 25 мм/мин)

Fig. 5. Example of a graph showing the change in force components over cutting time during milling process along the growing direction (B = 2 mm, V = 16 m/min, t = 1 mm, f_{min} = 25 mm/min)

должно было бы приводить к периодическому обнулению силы резания, наблюдается непрерывное воздействие, наиболее ярко выраженное на графике силы подачи P_h (фиолетовая кривая). Более того, рост минимального значения силы P_h с увеличением подачи свидетельствует о комплексном взаимодействии инструмента и заготовки, выходящем за рамки простой модели однозубного резания. Анализ кривой силы резания P_h демонстрирует четкую картину, состоящую из четырех выраженных пиков и впадин. Эта периодичность однозначно указывает на то, что в процессе резания участвуют все четыре зуба фрезы, каждый из которых оставляет свой отпечаток на кривой. Наблюдаются небольшие, но заметные колебания амплитуды этих пиков, свидетельствующие о незначительном радиальном биении зубьев. Однако важно отметить, что максимальные значения силы P_h для соседних зубьев практически идентичны. Это равенство амплитуд для соседних зубьев говорит о том, что радиальное расстояние каждого из них от оси вращения фрезы одинаково. Данный факт позволяет с высокой степенью уверенности исключить любое смещение оси фрезы относительно цангового патрона в качестве причины регистрируемых колебаний силы резания.

Таким образом, мы приходим к выводу, что выявленные неравномерности в силовых характеристиках резания являются результатом технологических отклонений, допущенных на этапе производства фрезы. Эти отклонения, вероятно, заключаются в несовершенстве геометрии зубьев или в неточностях их размещения. В то же время можно утверждать, что установка и фиксация фрезы в патроне выполнены корректно и не являются причиной наблюдаемого явления. Детальное изучение кривой изменения силы P_h, демонстрирующей четкую повторяемость пиков и впадин, подтверждает это заключение, позволяя сосредоточить дальнейший анализ на технологических аспектах процесса изготовления инструмента. Необходимо провести более детальный анализ геометрии фрезы для определения точных причин этих отклонений от идеальной геометрии и оценки их влияния на качество обработки и точность размеров получаемой детали.

Анализ динамики силы резания P_h (см. рис. 4), являющейся наиболее показательной и легко наблюдаемой составляющей силового взаимодействия, выявляет приблизительно симметричные характеры ее нарастания и спада при встречном фрезеровании. Это несколько противоречит ожидаемой асимметрии, обусловленной значительно более коротким периодом выхода зуба из зоны резания по сравнению с периодом его входа. Теоретически быстрое уменьшение толщины среза перед полным выходом зуба должно приводить к более крутому спаду силы P_h. Это объясняется изменением ориентации вектора силы P_z при приближении зуба к точке выхода. В момент, предшествующий выходу зуба фрезы из зоны контакта, происходит поворот P_z в направлении вращения фрезы. Это дает более значительное увеличение радиальной составляющей силы P_v, чем силы P_h. В результате снижение силы P_h начинается раньше – еще до того, как главная режущая кромка полностью покидает зону контакта с заготовкой.

Наличие угла наклона режущей кромки, обозначаемого как ω (или β в некоторых зарубежных публикациях), играет ключевую роль в процессе фрезерования. Этот угол препятствует тому, чтобы вся режущая кромка одновременно входила в зону контакта с обрабатываемой заготовкой или выходила из нее. Вместо резкого прекращения резания происходит более постепенный процесс. Отдельные участки режущей кромки последовательно выходят из взаимодействия с материалом. Ширина фрезерования B и угол наклона ω оказывают существенное влияние на плавность снижения всех составляющих силы резания – осевой P_x, тангенциальной P_z и радиальной P_y. Чем больше значения этих параметров, тем более плавным и менее резким будет спад сил резания при выходе зуба из зоны обработки. Это объясняется тем, что более широкий инструмент и больший угол наклона обеспечивают более постепенное изменение площади контакта между инструментом и заготовкой. Более плавный спад сил резания, в свою очередь, приводит к снижению вибраций и улучшению качества обработки.

Однако в процессе фрезерования, особенно при встречном фрезеровании, наблюдается сложное взаимодействие нескольких факторов. Вращательное движение фрезы, изменение ориентации векторов сил P_z и P_y, а также одновременное изменение толщины среза a приводят

к некоторому фазовому сдвигу между изменениями сил. Этот сдвиг проявляется в том, что изменение радиальной силы P_y (на графике рис. 4 – боковой P_v) не совпадает идеально по времени с изменением тангенциальной силы P_z (на графике рис. 4 – силы подачи P_h). Этот фазовый сдвиг, хотя и незначительный, является следствием динамических процессов, протекающих в зоне резания, и влияет на общую картину силового взаимодействия. Понимание взаимосвязи между геометрическими параметрами инструмента (ω и B), кинематикой процесса (вращение фрезы) и динамикой сил резания (P_z, P_y, P_h, P_v) необходимо для оптимизации процесса фрезерования и достижения наилучшего качества обработки (см. рис. 5). Более точное моделирование процесса требует учета всех этих факторов, а также влияния геометрии инструмента, свойств обрабатываемого материала и параметров резания.

Заключение

Исследование фрезерования заготовок из жаропрочного сплава инконель 625, полученных методом электродуговой наплавки, выявило ряд ключевых зависимостей и закономерностей, имеющих практическое значение для оптимизации технологического процесса.

Микроструктура образцов из инконеля 625, сформированная методом WAAM, оказывает существенное влияние на силы резания. Анализ микроструктуры показал неоднородность распределения твердости и размера зерен, обусловленную неравномерным нагревом и охлаждением при послойном наращивании. Установлена корреляция между локальными изменениями микротвердости и силами резания – повышенная твердость в поверхностных слоях и отдельных зонах образца приводила к увеличению сил резания и более интенсивному износу инструмента по сравнению с традиционно изготовленными деталями. Это подчеркивает необходимость адаптации режимов резания к специфическим особенностям микроструктуры заготовок, полученных методом WAAM.

Оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимизацию сил резания и износа инструмента, существенно зависят от конкретных параметров обработки. Для фрезерования заготовок из инконеля 625, полученных WAAM-технологией, оптимально использовать высокопрочные твердосплавные фрезы с повышенной износостойкостью. Возможно применение фрез с износостойкими покрытиями (например, TiAlN, AlCrN) для увеличения срока службы инструмента. Лучше всего применять фрезы специальной геометрии и большего диаметра, чем при обработке стали 40Х13. Увеличение диаметра фрезы более 8 мм приводит к повышению стоимости фрезы пропорционально квадрату диаметра фрезы. Для грубой обработки следует рассмотреть использование фрез с увеличенным углом наклона винтовой канавки с целью более плавного входа и выхода из материала и снижения вибраций. Фрезерование рекомендуется начинать с небольших значений скорости резания (например, при V = 15,8 м/мин). Затем можно постепенно увеличивать скорость, контролируя при этом температуру режущей кромки и износ инструмента. Следует избегать слишком высоких подач (80 мм/мин и более при подаче вдоль образца), особенно при фрезеровании перпендикулярно направлению наплавки, чтобы не вызвать чрезмерных сил резания и износ инструмента.

Использование попутной схемы фрезерования при обработке сплава инконель 625 категорически недопустимо, так как это приводит к рывкам стола и поломке фрезы, что особенно проявляется при подаче более 40 мм/мин. Чрезмерное увеличение скорости резания (более 50 м/мин) при фрезеровании сплава инконель 625 приводит к налипанию обрабатываемого материала на зуб фрезы из-за увеличения температуры в зоне резания, что, в свою очередь, может привести к резкому увеличению сил резания и поломке фрезы.

Увеличение количества зубьев при неизменном диаметре фрезы приводит к привариванию стружки к стружечной винтовой канавке, а также к резкому увеличению температуры в зоне резания из-за трения спрессованного материала стружки в канавке с поверхностью резания и выходу фрезы из рабочего состояния.

Применение специализированного инструмента является необходимым условием эффективной обработки. Повышенная абразивность и неоднородность образцов из инконеля 625, полученных методом WAAM, требуют использования высокопрочных твердосплавных фрез

с повышенной износостойкостью и потенциально – специальной геометрии. Разработанные в рамках исследования эмпирические зависимости, а также рекомендации по выбору инструмента и подбору режимов резания для фрезерования заготовок из инконеля 625, полученных методом WAAM, позволят повысить эффективность и производительность обработки аддитивно изготовленных деталей. Однако необходимы дальнейшие исследования для более глубокого понимания влияния остаточных напряжений и развития методов их контроля. Это позволит оптимизировать процессы фрезерования для достижения высоких значений качества обработки, производительности и экономической эффективности.

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. On the microstructure and corrosion behavior of wire arc additively manufactured AISI 420 stainless steel / M. Kazemipour, J.H. Lunde, S. Salahi, A. Nasiri // TMS 2020: 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. – Cham: Springer, 2020. – P. 435–448. – DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6_41.

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. Ultra-high strength martensitic 420 stainless steel with high ductility / K. Saeidi, D.L. Zapata, F. Lofaj, L. Kvetkova, J. Olsen, Z. Shen, F. Akhtar // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 29. – P. 100803. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.100803.

5. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels / P. Krakhmalev, I. Yadroitsava, G. Fredriksson, I. Yadroitsev // Materials & Design. – 2015. – Vol. 87. – P. 380–385. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.045.

6. Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties / J. Ge, J. Lin, Y. Chen, Y. Lei, H. Fu // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 748. – P. 911–921. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.222.

7. Process parameters effect on weld beads geometry deposited by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) / S. Manokruang, F. Vignat, M. Museau, M. Limousin // Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, June 2–4, 2020. – Cham: Springer, 2021. – P. 9–14. – DOI: 10.1007/978-3-030-70566-4_3.

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. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) / J.G. Lopes, C.M. Machado, V.R. Duarte, T.A. Rodrigues, T.G. Santos, J.P. Oliveira // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 739–749. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.007.

10. New observations on wear characteristics of solid Al_2O_3/Si_3N_4 ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V / J. Dang, H. Zhang, W. Ming, O. An, M. Chen // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46 (5). – P. 5876–5886. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.

11. Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy / A. Bordin, S. Bruschi, A. Ghiotti, P.F. Bariani // Wear. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 89–99. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.030.

12. Influence of finish machining on the surface integrity of Ti6Al4V produced by selective laser melting / S. Milton, A. Morandeau, F. Chalon, R. Leroy // Procedia Cirp. – 2016. – Vol. 45. – P. 127–130. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.340.

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. The effect of finish-milling operation on surface quality and wear resistance of Inconel 625 produced by selective laser melting additive manufacturing / E. Tascioglu, Yu. Kaynak, Ö. Poyraz, A. Orhangül, S. Ören // Advanced Surface Enhancement (INCASE 2019). – Singapore: Springer, 2020. – P. 263–272. – DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_27.

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. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process / F. Hojati, A. Daneshi, B. Soltani, B. Azarhoushang, D. Biermann // Precision Engineering. – 2020. – Vol. 62. – P. 1–9. – DOI: 10.1007/s00170-020-06391-7.

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 (5). – 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. SLS setup and its working procedure / R. Ahmetshin, V. Fedorov, K. Kostikov, N. Martyushev, V. Ovchinnikov, A. Rasin, A. Yakovlev // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 477–481. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.477.

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. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy / M.E. Isametova, N.V. Martyushev, Y.I. Karlina, R.V. Kononenko, V.Y. Skeeba, B.N. Absadykov // Materials. – 2022. – Vol. 15 (19). – P. 6682. – DOI: 10.3390/ma15196682.

23. Provision of rational parameters for the turning mode of small-sized parts made of the 29 NK alloy and beryllium bronze for subsequent thermal pulse deburring / N.V. Martyushev, D.A. Bublik, V.V. Kukartsev, V.S. Tynchenko, R.V. Klyuev, Y.A. Tynchenko, Y.I. Karlina // Materials. – 2023. – Vol. 16 (9). – P. 3490. – DOI: 10.3390/ma16093490.

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. *Abootorabi Zarchi M.M., Razfar M.R., Abdullah A.* Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 66. – P. 83–89. – DOI: 10.1007/s00170-012-4307-9.

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. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces / N.V. Martyushev, V.N. Kozlov, M. Qi, V.S. Tynchenko, R.V. Kononenko, V.Y. Konyukhov, D.V. Valuev // Materials. – 2023. – Vol. 16 (13). – P. 4529. – DOI: 10.3390/ma16134529.

29. Возможности атомно-силовой микроскопии для исследования микроструктуры нержавеющей стали при различных видах термообработки / Г.В. Шляхова, А.В. Бочкарёва, С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев, Е.В. Мартусевич // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2017. – Т. 60 (2). – С. 133–139. – DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-133-139.

30. *Хайдоров А.Д., Юнусов Ф.А.* Вакуумная термическая обработка высоколегированных коррозионностойких сталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 226–235.

31. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher / V.P. Kondrakhin, R.V. Klyuev, S.N. Sorokova, E.A. Efremenkov, D.V. Valuev, Q. Mengxu // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – P. 2345. – DOI: 10.3390/math11102345.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 61–76
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-61-76

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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

Milling of Inconel 625 blanks fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM)

Nikita Martyushev [1, a, *], *Victor Kozlov* [1, b], *Aleksandr Boltrushevich* [1, c], *Yulia Kuznetsova* [2, d], *Aleksandr Bovkun* [3, e]

[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
[3] Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-9351-5713, kozlov-viktor@bk.ru;
[c] https://orcid.org/0009-0004-0265-1680, aeb20@tpu.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-1388-6125, julx@bk.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-0623-4284, Bovas87@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 10 December 2024
Revised: 30 December 2024
Accepted: 23 January 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Inconel 625
Wire arc additive manufacturing (*WAAM*)
Milling
Cutting forces
Cutting modes
Hardness
Tool wear

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. Additive manufacturing technologies, in particular wire arc additive manufacturing (*WAAM*), have been gaining increasing popularity recently. This method allows for the production of blanks with significantly increased hardness compared to traditional methods such as forging, which in turn significantly increases the cutting force during subsequent machining. The present study is aimed at investigating the cutting forces during milling of samples made from the high-strength, heat-resistant alloy *Inconel 625* obtained by *WAAM*. **The aim of the work** is to investigate the influence of microstructure and properties of *Inconel 625* fabricated by *WAAM,* on cutting forces during milling. Particular attention is paid to the search for optimal cutting modes, providing minimization of cutting forces and vibrations in the "machine-utility-tool-part" system. **Methods of research.** Samples were produced by *WAAM* using wire made from heat-resistant nickel-based alloy *Inconel 625*. A comprehensive analysis of the microstructure of the obtained samples was carried out using modern materials science methods. The main attention is paid to the experimental study of cutting forces during milling using different machining modes (cutting speed, feed rate, and depth of cut) and types of cutters. **Results and Discussion.** The microstructure of *Inconel 625* samples obtained by *WAAM* is characterized in detail. Optimal milling modes will be determined to ensure efficient machining of the material, taking into account its high hardness and strength. It is expected that machining of *Inconel 625* blanks will require high-strength carbide milling cutters, possibly of special geometry and with increased wear resistance, with a larger diameter compared to milling of steel *0.4 C-13 Cr*. The results of the study allow developing recommendations for selecting optimal cutting modes minimizing cutting force, cutting edge temperature, tool wear and vibrations in the "machine-utility-tool-part" system, thereby improving processing productivity and accuracy.

For citation: Martyushev N.V., Kozlov V.N., Boltrushevich A.E., Kuznetsova Yu.S., Bovkun A.S. Milling of Inconel 625 blanks fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 61–76. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-61-76. (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.

*** Corresponding author**
Martyushev 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

2. Kazemipour M., Lunde J.H., Salahi S., Nasiri A. On the microstructure and corrosion behavior of wire arc additively manufactured AISI 420 stainless steel. *TMS 2020: 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. Cham, Springer, 2020, pp. 435–448. DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6_41.

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. Saeidi K., Zapata D.L., Lofaj F., Kvetkova L., Olsen J., Shen Z., Akhtar F. Ultra-high strength martensitic 420 stainless steel with high ductility. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 29, p. 100803. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100803.

5. Krakhmalev P., Yadroitsava I., Fredriksson G., Yadroitsev I. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels. *Materials & Design*, 2015, vol. 87, pp. 380–385. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.045.

6. Ge J.,Lin J., Chen Y., Lei Y., Fu H. Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 748, pp. 911–921. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.222.

7. Manokruang S., Vignat F., Museau M., Limousin M. Process parameters effect on weld beads geometry deposited by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III*. Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, June 2–4, 2020. Cham, Springer, 2021, pp. 9–14. DOI: 10.1007/978-3-030-70566-4_3.

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. Lopes J.G., Machado C.M., Duarte V.R., Rodrigues T.A., Santos T.G., Oliveira J.P. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 739–749. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.007.

10. Dang J., Zhang H., Ming W., An Q., Chen M. New observations on wear characteristics of solid Al_2O_3/Si_3N_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. Bordin A., Bruschi S., Ghiotti A., Bariani P.F. Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy. *Wear*, 2015, vol. 328–329, pp. 89–99. DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.030.

12. Milton S., Morandeau A., Chalon F., Leroy R. Influence of finish machining on the surface integrity of Ti6Al4V produced by selective laser melting. *Procedia Cirp*, 2016, vol. 45, pp. 127–130. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.340.

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. Tascioglu E., Kaynak Y., Poyraz Ö., Orhangül A., Ören S. The effect of finish-milling operation on surface quality and wear resistance of Inconel 625 produced by selective laser melting additive manufacturing. *Advanced Surface Enhancement (INCASE 2019)*. Singapore, Springer, 2020, pp. 263–272. DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_27.

15. Montevecchi 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. Hojati F., Daneshi A., Soltani B., Azarhoushang B., Biermann D. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process. *Precision Engineering*, 2020, vol. 62, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00170-020-06391-7.

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 (5), 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. Ahmetshin R., Fedorov V., Kostikov K., Martyushev N., Ovchinnikov V., Rasin A., Yakovlev A. SLS setup and its working procedure. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 477–481. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.477.

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. Isametova M.E., Martyushev N.V., Karlina Y.I., Kononenko R.V., Skeeba V.Y., Absadykov B.N. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy. *Materials*, 2022, vol. 15 (19), p. 6682. DOI: 10.3390/ma15196682.

23. Martyushev N.V., Bublik D.A., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Klyuev R.V., Tynchenko Y.A., Karlina Y.I. Provision of rational parameters for the turning mode of small-sized parts made of the 29 NK alloy and beryllium bronze for subsequent thermal pulse deburring. *Materials*, 2023, vol. 16 (9), p. 3490. DOI: 10.3390/ma16093490.

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. Abootorabi Zarch M.M., Razfar M.R., Abdullah A. Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 83–89. DOI: 10.1007/s00170-012-4307-9.

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. Martyushev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Tynchenko V.S., Kononenko R.V., Konyukhov V.Y., Valuev D.V. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces. *Materials*, 2023, vol. 16 (13), p. 4529. DOI: 10.3390/ma16134529.

29. Shlyakhova G.V., Bochkareva A.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Martusevich E.V. Vozmozhnosti atomno-silovoi mikroskopii dlya issledovaniya mikrostruktury nerzhaveyushchei stali pri razlichnykh vidakh termoobrabotki [Application of atomic force microscopy for stainless steel microstructure study at various kinds of heat treatment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60 (2), pp. 133–139. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-133-139.

30. Haidorov A.D., Yunusov F.A. Vakuumnaya termicheskaya obrabotka vysokolegirovannykh korrozionnostoikikh stalei [Vacuum heat treatment of high alloy corrosion-resistant steels]. *Nauchno-tekhnicheskie 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. Kondrakhin V.P., Klyuev R.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Mengxu Q. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher. *Mathematics*, 2023, vol. 11, p. 2345. DOI: 10.3390/math11102345.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

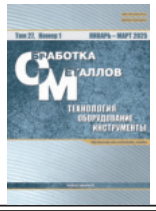
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 77–92
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании

Дмитрий Фатюхин [1, a, *], ***Равиль Нигметзянов*** [2, b], ***Вячеслав Приходько*** [3, c], ***Сергей Сундуков*** [4, d], ***Александр Сухов*** [5, e]

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-5914-3415, mitriy2@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0009-0008-1443-7584, lefmo@yandex.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-8261-0424, prikhodko@madi.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-4393-4471, sergey-lefmo@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0009-9097-8216, sukhov-aleksandr96@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.9.048.6

История статьи:
Поступила: 22 ноября 2024
Рецензирование: 03 декабря 2024
Принята к печати: 03 февраля 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Ультразвук
Поверхностный слой
Ультразвуковые колебания
Поверхностное деформирование
Шероховатость
Микротвердость

Финансирование
Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Российского научного фонда № 24-19-00463, https://rscf.ru/project/24-19-00463/.

АННОТАЦИЯ

Введение. Среди способов модификации поверхностей металлических изделий, позволяющих изменить физико-механические и геометрические свойства поверхностного слоя, наиболее распространены способы поверхностного пластического деформирования (ППД). Использование ультразвука для повышения эффективности деформационных процессов позволяет повысить микротвердость и снизить шероховатость по сравнению с обкатыванием и выглаживанием. Наибольшие технологические сложности вызывает ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование криволинейных поверхностей, в том числе полученных аддитивными технологиями. Учитывая, что большинство способов ультразвукового ППД основано на продольном характере колебаний, для обеспечения равномерной обработки криволинейных поверхностей ось инструмента должна быть направлена под заданным углом к любому участку обрабатываемой поверхности. В связи с этим **целью работы** является изучение влияния угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. **В работе** исследованы образцы стали 45, обработанные ультразвуковым ППД с разными углами наклона колебательной системы: 90°, 75°, 60°, 45°. **Методами исследования** являлись металлографические исследования микроструктуры поверхностного слоя образцов, измерение их микротвердости и шероховатости, а также сравнительные испытания на износ. **Результаты и обсуждение.** Ультразвуковое поверхностное деформирование при любом из рассмотренных углов наклона инструмента α создает наклепанный слой – от 30 мкм при α = 45° до 350 мкм при α = 90°. При этом микротвердость повышается до 240 HV при α = 45°. При любом α также наблюдается значительное уменьшение шероховатости. Так, например, высотные параметры уменьшаются более чем в 8 раз. Лучшие результаты достигнуты при α = 60°. Результаты испытаний на износ показали, что износ по массе значительно уменьшается при ультразвуковой обработке. Наибольшее снижение износа (более чем в 2 раза) наблюдается при угле наклона α = 90°.

Для цитирования: Влияние угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании / Д.С. Фатюхин, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, С.К. Сундуков, А.В. Сухов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 77–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92.

Введение

Требования к показателям надежности современной техники основаны на эксплуатационных свойствах деталей и сборочных единиц, таких как износостойкость, усталостная и коррозионная стойкость и др. Эти свойства в большей степени определяются комплексом физико-механических и геометрических свойств поверхностных слоев деталей. В настоящее время существует широкий спектр технологических методов формирования структуры, микротвердости, параметров шероховатости и субшероховатости. Наиболее востребованы методы, позволяющие обеспечить заданные характеристики поверхностей изделий без снятия слоя материала. К ним в первую очередь относятся методы поверхностного пластического деформирования (ППД) [1].

***Адрес для переписки**
Фатюхин Дмитрий Сергеевич, д.т.н., доцент
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Ленинградский проспект, 64,
125319, г. Москва, Россия
Тел.: +7 968 868-60-73, **e-mail:** mitriy2@yandex.ru

Как статические, так и динамические методы ППД могут быть значительно усовершенствованы наложением ультразвуковых колебаний на рабочий инструмент [2]. Такой технологический прием позволяет существенно повысить степень деформационного упрочнения и твердость, а также снизить шероховатость и получать регулярный микрорельеф.

Интенсификация процессов ППД с помощью ультразвука применяется широко. Этому виду обработки посвящено большое количество работ, как фундаментальных [4, 8, 9], так и прикладных [14, 15, 16].

Две основные схемы обработки ультразвуковым ППД основаны на применении деформирующих элементов, жестко связанных с колебательной системой или не имеющих жесткой связи с источником колебаний [23].

В 1964 году И.И. Мухановым впервые был предложен метод обработки ультразвуковым ППД жестко связанным с колебательной системой рабочим инструментом [21]. В развитие этого метода в 1975 году И.А. Стебельков запатентовал вид обработки свободными рабочими телами [22]. Жестко связанный рабочий инструмент позволяет производить более равномерную обработку и получить меньшую шероховатость поверхности, чем при обработке свободным деформирующим элементом [3, 6]. Однако при обработке свободным деформирующим элементом удается достичь большей степени деформационного упрочнения и глубины упрочненного слоя [25].

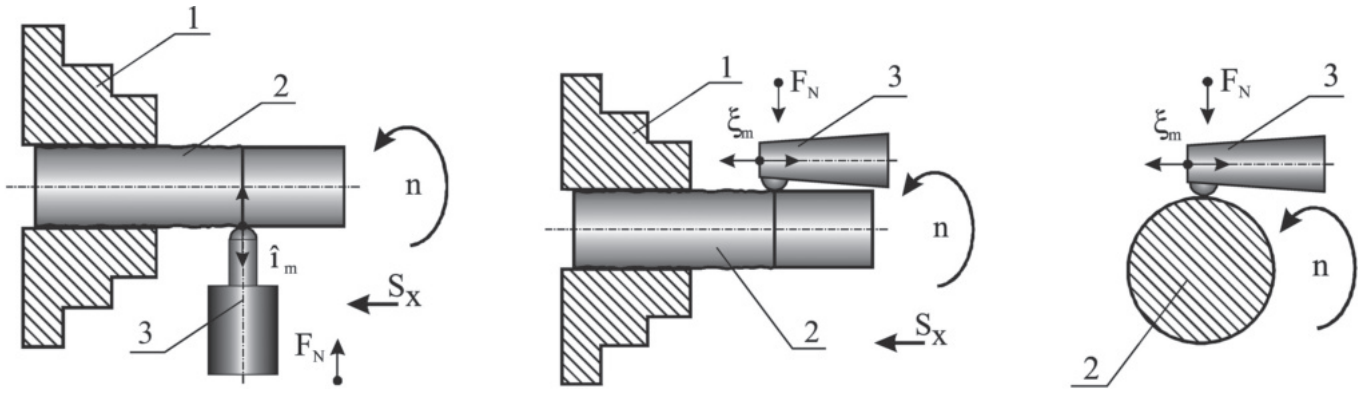
Одним из основных направлений работ по ультразвуковому ППД является изучение влияния этого метода обработки на структуру и свойства различных материалов на основе железа [5, 7], титана, алюминия и др. [11–13]. В последнее время это направление развивается в области нанотехнологий [20, 26].

Большинство технических решений по ультразвуковому ППД основано на передаче продольных колебаний рабочему инструменту. Используемое для получения наименьшей шероховатости ультразвуковое выглаживание может быть реализовано по трем схемам обработки, представленным на рис. 1.

Наибольшую сложность представляет обработка криволинейных поверхностей, в том числе полученных аддитивными технологиями [33–36].

При прямолинейном перемещении колебательной системы с инструментом вдоль криволинейной поверхности их силовое взаимодействие может значительно изменяться. Ось инструмента отклоняется от нормали к поверхности, и статическая сила прижима F раскладывается на составляющие (рис. 2).

При положении оси инструмента под углом $\alpha = 90°$ и статической силе прижима F существует только нормальная составляющая этой силы F_N, т. е. $F = F_N$. При $\alpha \neq 90°$ кроме нормальной



а *б* *в*

Рис. 1. Схемы обработки поверхностным пластическим деформированием:
а – с нормальными колебаниями; *б*, *в* – с тангенциальными колебаниями (*1* – патрон, *2* – обрабатываемая заготовка, *3* – инструмент)

Fig. 1. Surface plastic deformation (*SPD*) processing schemes:
а – with normal vibrations; *б*, *в* – with tangential vibrations (*1* – chuck, *2* – workpiece, *3* – tool)

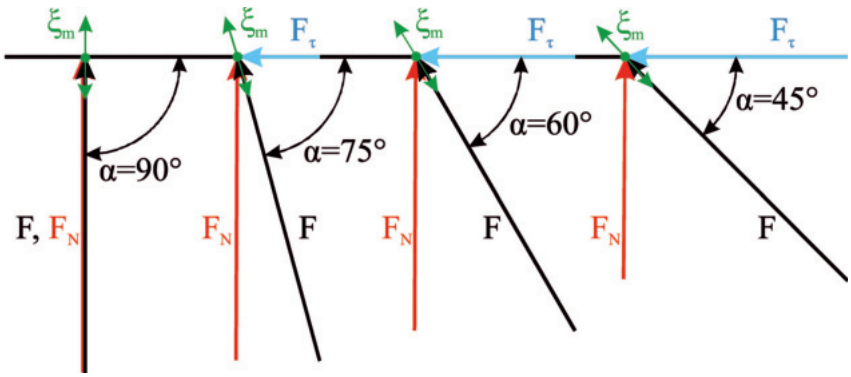


Рис. 2. Изменение нормальной F_N и тангенциальной F_τ составляющих силы взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при разных углах наклона инструмента α (ξ_m – амплитуда колебаний излучателя)

Fig. 2. Change in the normal F_N and tangential F_τ components of the interaction force between the tool and the workpiece surface at different tool inclination angles α (ξ_m – the amplitude of vibrations of the ultrasonic emitter)

составляющей F_N появляется и тангенциальная (касательная) составляющая F_τ. В этом случае $F_N = F\sin\alpha$, а $F_\tau = F\cos\alpha$. Таким же образом изменяется и периодическая сила, создаваемая инструментом.

Соответственно изменяется и характер воздействия на поверхность. При α = 90° и $F_N = F_{N\max}$ каждое колебание инструмента оставляет на поверхности сферический отпечаток, в центре которого нормальные деформации будут максимальны (рис. 3, *а*). При α ≠ 90° и наличии составляющей F_τ инструмент проскальзывает вдоль поверхности, и отпечатки вытягиваются, причем в начале отпечатка преобладают нормальные деформации, а в конце – сдвиговые (рис. 3, *б*). То есть по аналогии со статическими видами поверхностного пластического деформирования при α = 90° процесс осуществляется по схеме выглаживания, а при α ≠ 90° – по схеме вибрационного выглаживания.

Учитывая продольный характер колебаний, для обеспечения равномерной обработки криволинейных поверхностей ось инструмента должна быть направлена под заданным углом к любому участку обрабатываемой поверхности.

С целью повышения качества обработки поверхностей со сложной геометрией способы ультразвукового ППД совершенствуются и модернизируются [17, 19]. Появились способы обработки многоэлементными деформирующими инструментами [23, 24], а также гибридные способы, сочетающие в себе признаки выглаживающей и ударной обработки [27, 28] или комбинацию ППД с термической [31, 32] и химико-термической обработкой [29, 30].

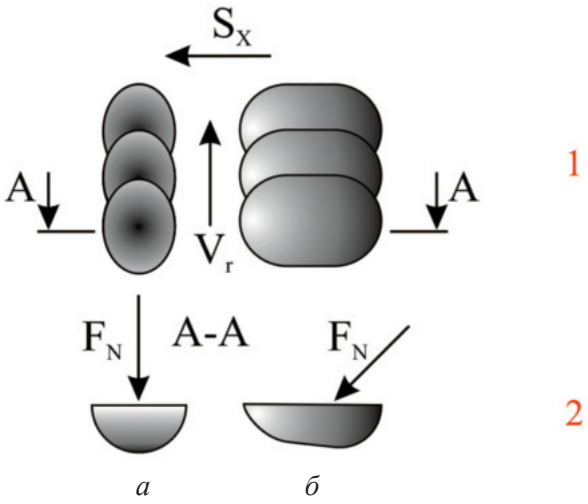


Рис. 3. Следы (*1*) и поперечные сечения следов (*2*) рабочего инструмента на поверхности образца:

а – при α = 90°; *б* – при α ≠ 90°

Fig. 3. Traces (*1*) and cross-sections of traces (*2*) of the working tool traces on the sample surface:

а – at α = 90°; *б* – at α ≠ 90°

В связи с этим ***целью работы*** является изучение влияния угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие ***задачи***:

– проанализировать изменение микроструктуры образцов, обработанных ультразвуковым ППД;

– оценить изменения микротвердости и шероховатости образцов;

– провести сравнительные испытания на износ образцов;

– предложить технологические рекомендации по эффективному применению обработки ультразвуковым ППД при различных углах наклона колебательной системы.

Методика исследований

Материалы и методика подготовки образцов

Для проведения экспериментальных исследований использовался горячекатаный пруток из конструкционной стали 45 диаметром 42 мм. Из прутка изготавливались цилиндрические образцы длиной 300 мм. Химический состав стали определялся спектральным анализом с помощью спектрометра Foundry-Master LAB (ООО «СИНЕРКОН», Москва, Россия). Состав приведен в таблице.

Образцы обрабатывались на токарном станке нормальной точности 16Е20 (Алма-Атинский станкостроительный завод, Алма-Ата, Казахстан). С образцов удалялся поверхностный слой толщиной 0,75 мм, после этого происходила обработка контурным резцом со следующими параметрами: подача резца S_X = 0,34 мм/об, частота вращения n = 560 об/мин, глубина резания t = 0,25 мм. При обработке контурным резцом с радиусом при вершине 0,4 мм был получен регулярный микрорельеф поверхности с шероховатостью поверхности Ra = 6,63 мкм, Rz = 30,1 мкм, R_{max} = 33,7 мкм, S_m = 0,260 мм, S = 0,055 мм, t_{30} = 11,6 % . Полученные значения соответствуют черновой обработке. Выбор параметров обработки образцов основан на анализе ранее проведенных исследований, например [37].

На образцах через каждые 50 мм делались проточки глубиной 3…4 мм, которые нужны для разделения поверхности образца на участки.

Однотипные образцы, изготовленные по приведенной методике, использовались для изучения влияния угла наклона колебательной системы на изменение свойств стали 45 под воздействием ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

После обработки образцы нормализовались при T = 860 °С. Микротвердость на поверхности образцов составляла 165 HV 20, сердцевины материала – 125 HV 20.

Методика проведения эксперимента и оборудование

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование проводилось по схеме, представленной на рис. 4. В резцедержателе токарного станка закреплялась ультразвуковая колебательная система с волноводом-концентратором. Использовалась стержневая трехполуволновая магнитострикционная колебательная система ПМС-2,0/22 (ООО «Афалина», Москва, Россия). Она состоит из магнитострикционного преобразователя, выполненного из сплава 49К2Ф и находящегося в кожухе водяного охлаждения, и припаянного к его торцу волновода-концентратора из титанового сплава.

Для обеспечения прижима индентора к обрабатываемой поверхности с необходимым усилием колебательная система снабжена пружиной, обеспечивающей заданное усилие прижима.

К волноводу колебательной системы посредством резьбового соединения присоединялся ступенчатый титановый излучатель с диаметром излучающей поверхности ∅16мм, который имеет коэффициент увеличения амплитуды колебаний k_y = 2. К рабочему торцу излучателя припаян индентор из твердого сплава ВК8. Индентор представляет собой пластину толщиной 6 мм в форме сегмента круга диаметром 16 мм. Край пластины закруглен.

Питание колебательной системы осуществлялось генератором УЗГ2-22 (ООО «Афалина», Москва, Россия), с максимальной выходной

Химический состав стали 45 [%]
Chemical composition of steel 45 (%)

Материал / Material	C	Cr	Mn	Ni	Cu	W	Si	Fe
45	0,46	0,09	0,55	0,27	0,1	0,01	0,21	98,31

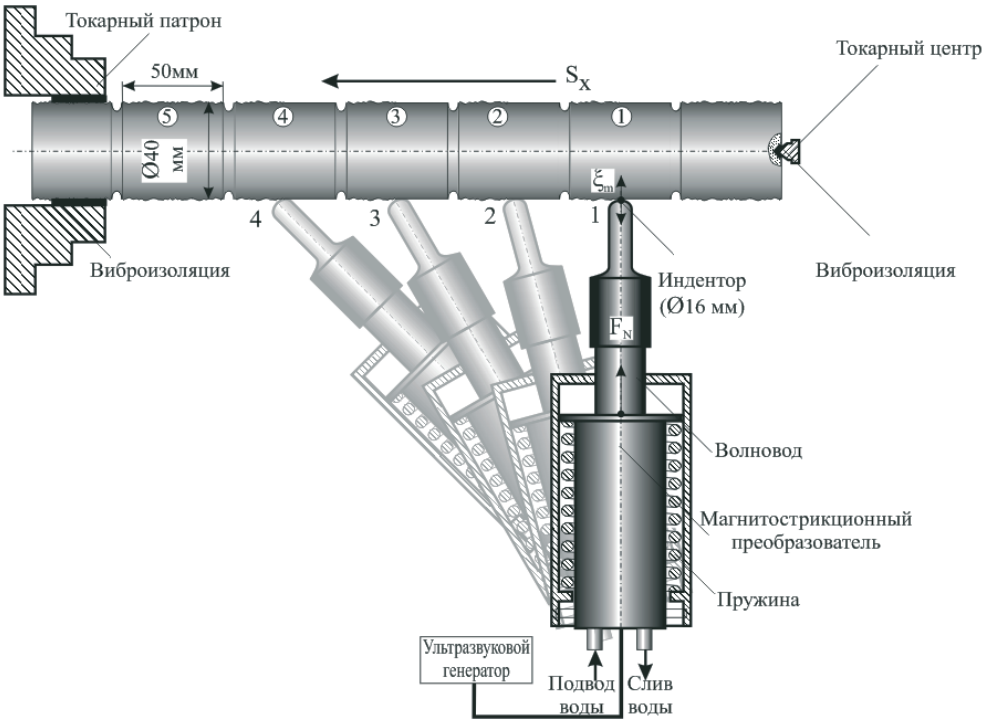


Рис. 4. Схема проведения эксперимента

Fig. 4. Design of an experiment

мощностью 2 кВт. Генератор имеет функции автоматической подстройки частоты (АПЧ) и амплитуды, которая позволяет изменять резонансную частоту при изменении механической нагрузки на торце излучателя.

Для измерений амплитуды колебательных смещений ξ_m использовался электродинамический виброметр, который представляет собой магнитную систему, состоящую из кольцевого постоянного магнита (ТУ 48-1301-16–73), измерительной катушки на каркасе из оргстекла, содержащей 800 витков провода ПЭВ2-0,1, и дисковых магнитопроводов. Виброметр располагали на волноводе стержневой колебательной системы.

Для оценки максимальной амплитуды колебаний ξ_m проводилась тарировка виброметра оптическим методом с помощью микроскопа. При работе колебательной системы сигнал с электродинамического виброметра подавался на вольтметр, шкала которого тарировалась с помощью микроскопа.

Образец с одной стороны закреплялся в патрон токарного станка, а с другой – поджимался токарным центром. Для предотвращения передачи высокочастотных колебаний на патрон и центр они снабжены фторопластовыми виброизоляционными прокладками.

Частота вращения шпинделя станка устанавливалась n = 560 об/мин, что для выбранного образца обеспечивает скорость обработки $V_r \approx 1{,}2$ м/с. Анализ литературы [25, 26] и данные предварительных экспериментов показывают, что изменение частоты вращения незначительно сказывается на изменении твердости и шероховатости. При варьировании скорости в широком диапазоне шероховатость при постоянных остальных параметрах изменялась не более чем на 8…12 %, а изменение твердости не превышало 10 %. Кроме того, при увеличении скорости значительно повышается и температура индентора.

На основании анализа исследований поверхностного пластического деформирования и данных предварительных экспериментов были выбраны параметры ультразвуковой обработки: продольная подача S_X, амплитуда колебаний ξ_{max} и усилие прижима F_N.

Для приведенного материала и условий обработки с уменьшением величины подачи S_X инструмента технологический эффект возрастает, но значительно снижается производительность обработки, поэтому было выбрано значение S_X = 0,24 мм/об. Амплитуда колебаний выбиралась в пределах ξ_m = 8…10 мкм, поскольку

при таких амплитудах наблюдается наиболее значительное снижение шероховатости поверхности. Увеличение усилия прижима свыше F_N = 100…120 Н не приводит к значимому результату, поэтому обработка проводилась при F_N = 100 Н.

Исследования влияния угла наклона колебательной системы на свойства деформированного слоя проводились следующим образом.

При обработке образца по схеме, приведенной на рис. 4, на участке *1* колебательная система с рабочим инструментом (индентором) устанавливалась в резцедержателе под углом α = 90° к поверхности образца. После обработки участка *1* поворотом резцедержателя изменялось положение колебательной системы. При обработке участка *2* угол наклона α колебательной системы составлял 75°, участка *3* – 60°, участка 4 – 45°. Участок *5* был оставлен в качестве контрольного образца.

Пример обработки участков образца при углах наклона колебательной системы 75° и 45° приведен на рис. 5.

Оценка микрогеометрии поверхности

У контрольных и обработанных образцов оценивались стандартные параметры шероховатости по ГОСТ 2789–73: среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, высота неровностей по 10 точкам *Rz*, максимальная высота неровностей профиля R_{max}, средний шаг неровностей профиля S_m, средний шаг местных выступов *S* и относительная опорная длина профиля t_p, где *p* – уровень сечения профиля. При измерениях уровень сечения профиля *p* принимался равным 30 %.

Измерение параметров шероховатости производилось на профилометре модели 130 (АО «Протон», Зеленоград, Россия).

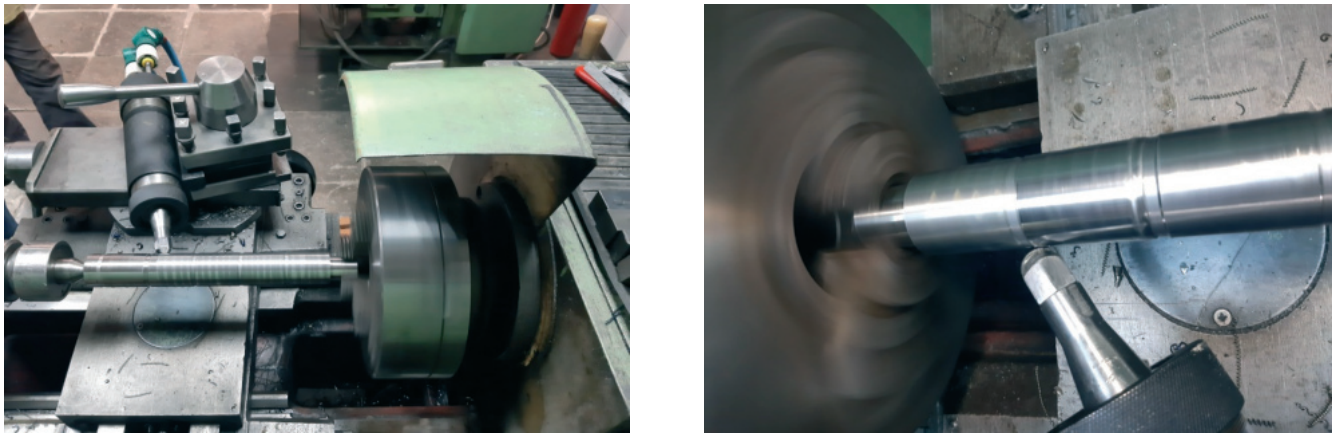
При построении зависимостей параметров шероховатости значения брались как среднее арифметическое из пяти измерений на разных участках образца. Полученные экспериментальные данные аппроксимировались методом наименьших квадратов. Числовая и графическая обработка результатов измерений выполнялась в программе Statistica. Поскольку разброс полученных значений не превышал интервал 3σ, то данные вполне могут считаться достоверными.

Оценка структуры и свойств поверхности

У контрольных и обработанных образцов также оценивались микроструктура и микротвердость.

Микроструктура изучалась на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-22 (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, Россия), представляющем собой инвертированный микроскоп с верхним расположением столика. Микроскоп предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом и темном поле. Диапазон увеличения 80–1000 крат.

Микротвердость образцов измерялась на микротвердомере ПМТ-3 (АО «ЛОМО», Санкт-



а *б*

Рис. 5. Обработка участков образца при углах наклона колебательной системы 75° (*а*) и 45° (*б*)

Fig. 5. Processing of sample sections at oscillating system inclination angles of 75° (*а*) and 45° (*б*)

Петербург, Россия) по методике, основанной на ГОСТ 2999–75. Глубина измененного слоя определялась в нормальном сечении.

Оценка трения и износа

Полученные образцы подвергались испытаниям на трение и изнашивание. Испытания проводились с помощью машины трения универсальной МТУ-01 (ООО «Продвинутые технологии», Москва) [38] по ТУ 32.99.53-001-78940767–2018.

Испытания проводились без использования смазочных материалов на образцах, представляющих собой сегмент цилиндра образца. В качестве контртела использовался стакан из стали 45 с наружным диаметром 34 мм и толщиной стенок 10 мм.

С помощью тензодатчиков МТУ-01 регистрировались момент трения и осевая нагрузка на шпинделе машины.

Схема контакта: торец вращающегося стакана и цилиндрическая поверхность образца. Графическое отображение изменений регистрируемых параметров записывается и обрабатывается компьютером с помощью программного модуля QMbox.

Износ при трении определялся по изменению веса испытуемых образцов до и после испытаний на аналитических весах GF-1000 (A&D Company, Limited, Japan) с дискретностью отсчета 0,001 г.

Результаты и их обсуждение

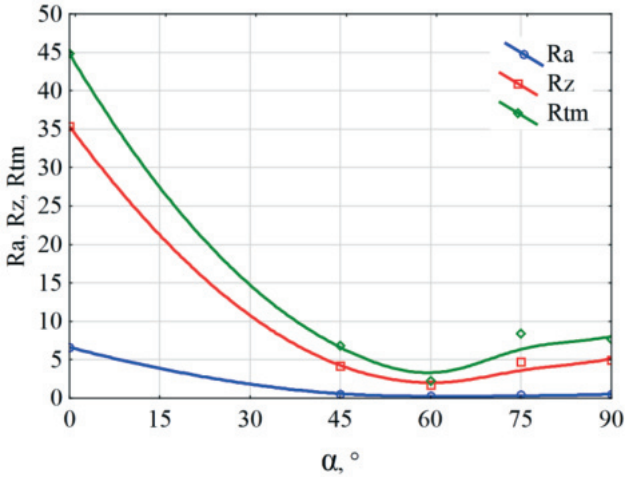
Шероховатость

При выбранном режиме ультразвукового поверхностного деформирования были получены результаты, представленные на рис. 6.

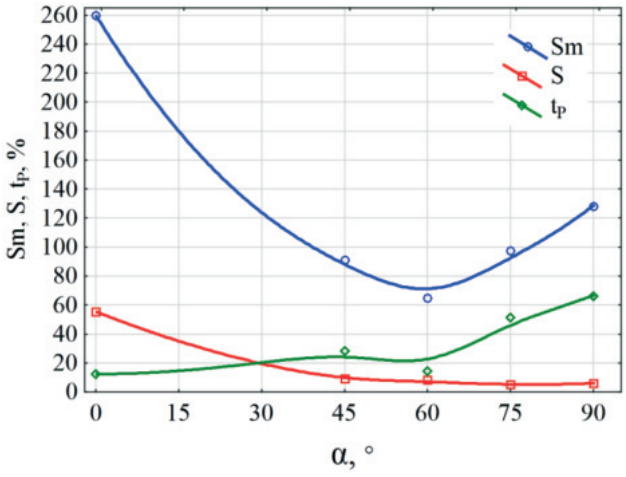
На представленных графиках значения шероховатости при α = 0° получены на образцах после токарной обработки с выбранными режимами без ультразвукового воздействия. Остальные зависимости получены при обработке образцов с углами наклона инструмента в рассматриваемом диапазоне 45°…90°. У всех образцов наблюдается значительное снижение высотных и шаговых параметров шероховатости, а также увеличение t_p. Наименьшие изменения наблюдаются при наклоне инструмента α = 90°, наибольшие – при α = 60°. Подобный характер изменений связан с тем, что при уменьшении α растет касательная составляющая статического усилия прижима F_τ и соответственно увеличиваются сдвиговые деформации.

На рис. 7 представлены профилограммы поверхности образцов до и после ультразвуковой обработки с разным углом наклона рабочего инструмента.

На профилограммах хорошо заметно формирование регулярного микрорельефа при обработке с углами наклона инструмента 90° и 75°. При меньших значениях углов регулярность нарушается, но происходит большее изменение параметров шероховатости.



а



б

Рис. 6. Зависимость изменения параметров шероховатости от угла наклона инструмента α:
а – высотных *Ra*, *Rz*, R_{tm}; *б* – шаговых S_m, *S*, t_p

Fig. 6. Dependence of the change in the roughness parameters on the tool inclination angle α:
а – altitude *Ra*, *Rz*, R_{tm}; *б* – spacing S_m, *S*, t_p

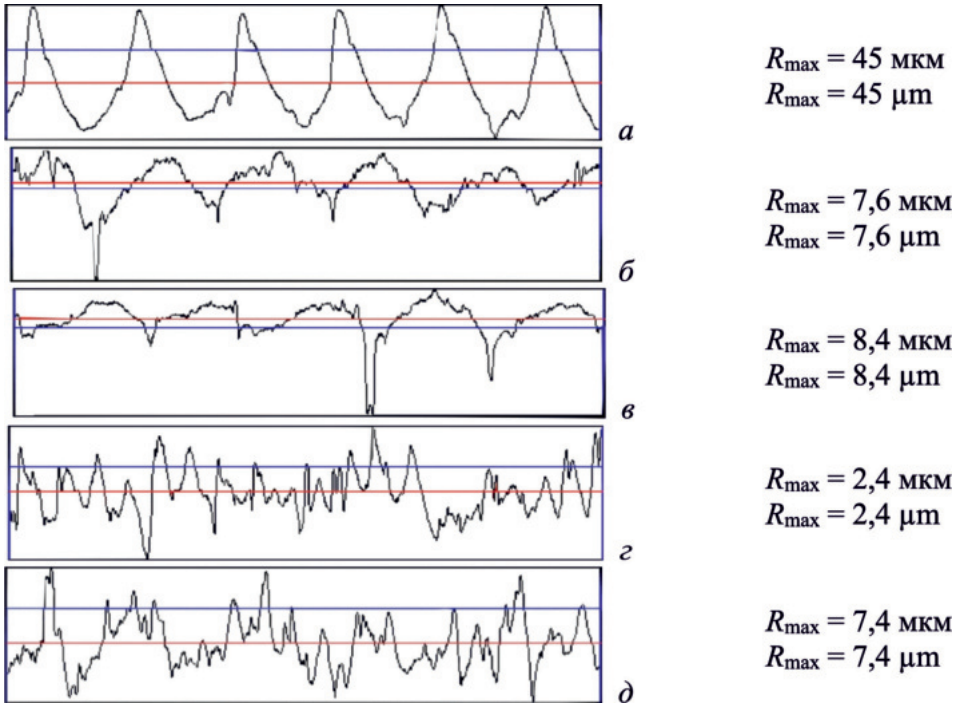


Рис. 7. Профилограммы поверхности, полученные при различных углах наклона рабочего инструмента:
а – без ППД; *б* – при α = 90°; *в* – при α = 75°; *г* – при α = 60°; *д* – при α = 45°

Fig. 7. Surface profiles obtained at different working tool inclination angles:
а – without *SPD*; *б* – at α = 90°; *в* – at α = 75°; *г* – at α = 60°; *д* – at α = 45°

Структура, твердость и микротвердость

При создании значительного усилия прижима деформирующий элемент и излучатель совершают синфазные колебания, т. е. инструмент не отрывается от обрабатываемой поверхности и условия обработки близки к выглаживанию. Основным механизмом, создающим деформации поверхностного слоя, является нагружение обрабатываемой поверхности шариком под действием статической силы прижима и значительно большей динамической силы, создаваемой колебаниями излучателя. При этом происходит как упрочнение, так и выглаживание поверхности.

Очевидно, что при наклоне инструмента α = 90° сила воздействия на поверхность имеет только одну нормальную оставляющую F_N, что создает наиболее благоприятные условия для упрочнения (наклёпа) поверхности. С уменьшением угла нормальная оставляющая F_N уменьшается, а касательная F_τ растет. Это приводит к снижению твердости и уменьшению глубины упрочненного слоя, но при этом уменьшается и размер микронеровностей за счет выглаживания.

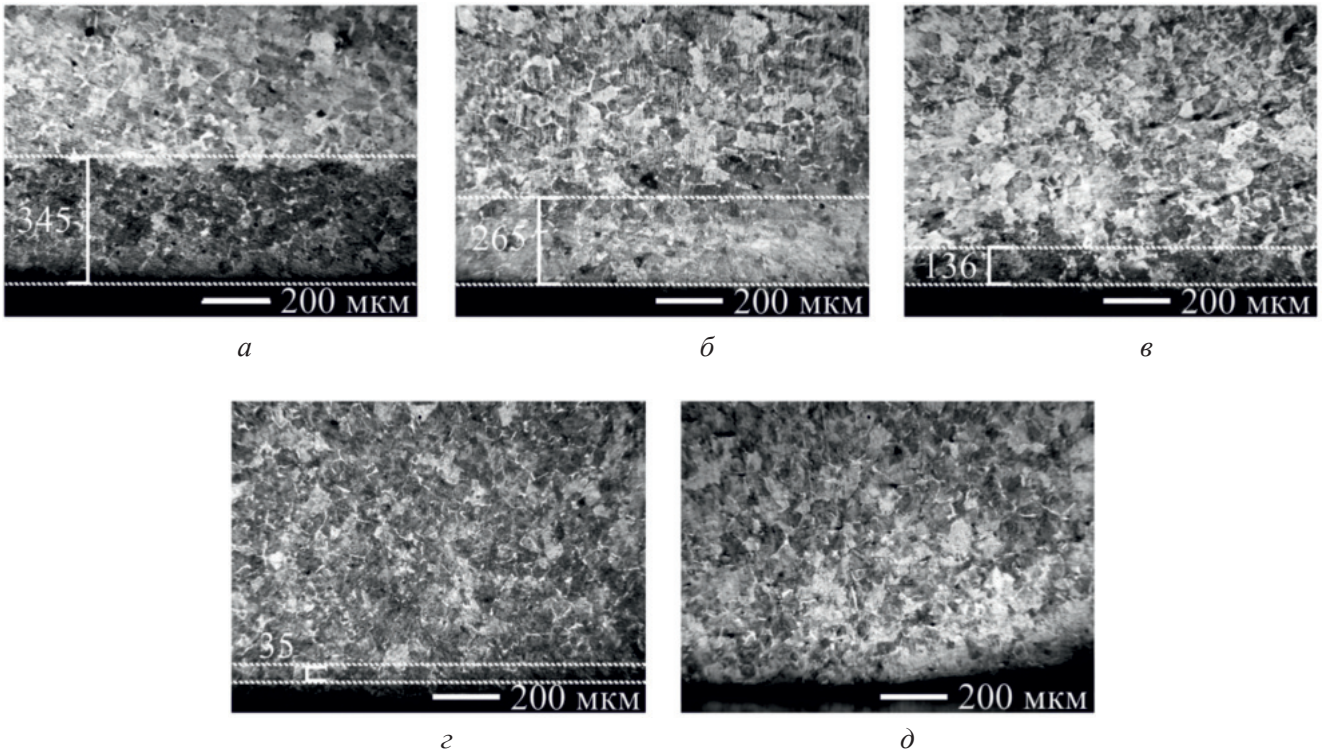
Результаты металлографических исследований представлены на рис. 8.

Как показывают результаты экспериментов (рис. 9), глубина наклепанного слоя увеличивается с увеличением угла наклона рабочего инструмента α. При α = 45° изменения структуры и свойств распространяются на глубину до 50 мкм, а при α = 90° глубина достигает 345 мм.

Очевидно, что глубина деформированного слоя определяется величиной нормальной оставляющей F_N силы. В то же время наибольшая микротвердость на глубине до 50 мкм достигается при α = 45°, что связано со сдвиговыми деформациями, создаваемыми касательной составляющей F_τ.

Момент трения и износ

Сравнительные испытания износа образцов проводились при постоянном усилии прижима между образцом и контртелом N = 25 Н. Частота вращения шпинделя n = 160 об/мин. В результате была получена зависимость (рис. 10) изменения момента трения $M_{тр}$ на протяжении 1000 циклов.



а *б* *в*

г *д*

Рис. 8. Структуры образцов, полученные при различных углах наклона рабочего инструмента:
а – при α = 90°; *б* – при α = 75°; *в* – при α = 60°; *г* – при α = 45°; *д* – без ППД

Fig. 8. Microstructures of samples obtained at different working tool inclination angles:
а – at α = 90°; *б* – at α = 75°; *в* – at α = 60°; *г* – at α = 45; *д* – without *SPD*

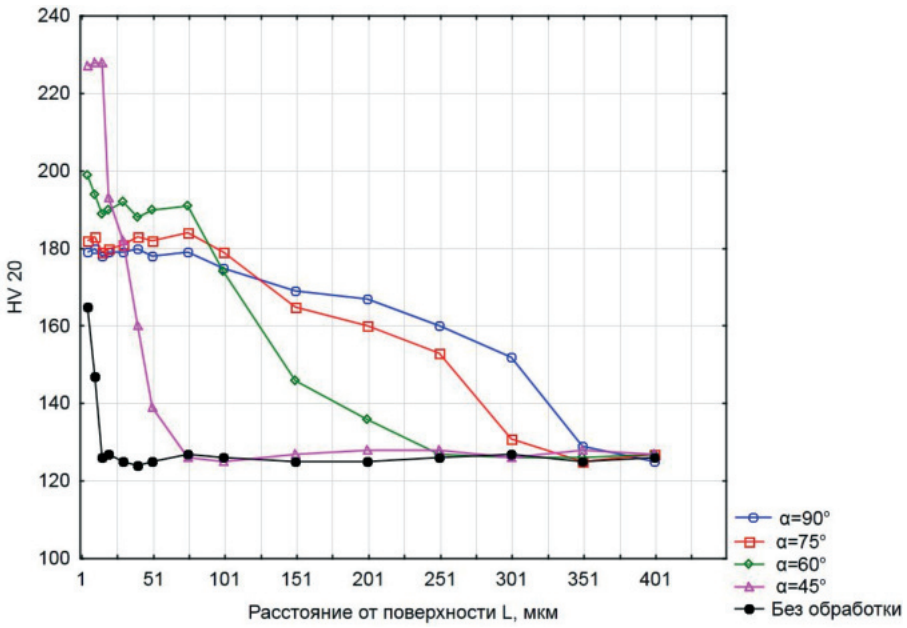


Рис. 9. Глубина наклепанного слоя *L* при различных углах наклона рабочего инструмента α

Fig. 9. Hardened layer depth *L* at different working tool inclination angles α

Как повышение твердости, так и снижение шероховатости оказывают определенное влияние на процессы трения и изнашивания. Результаты проведенных исследований показывают, что момент трения $M_{тр}$ для всех испытуемых образцов на протяжении 450…550 циклов растет.

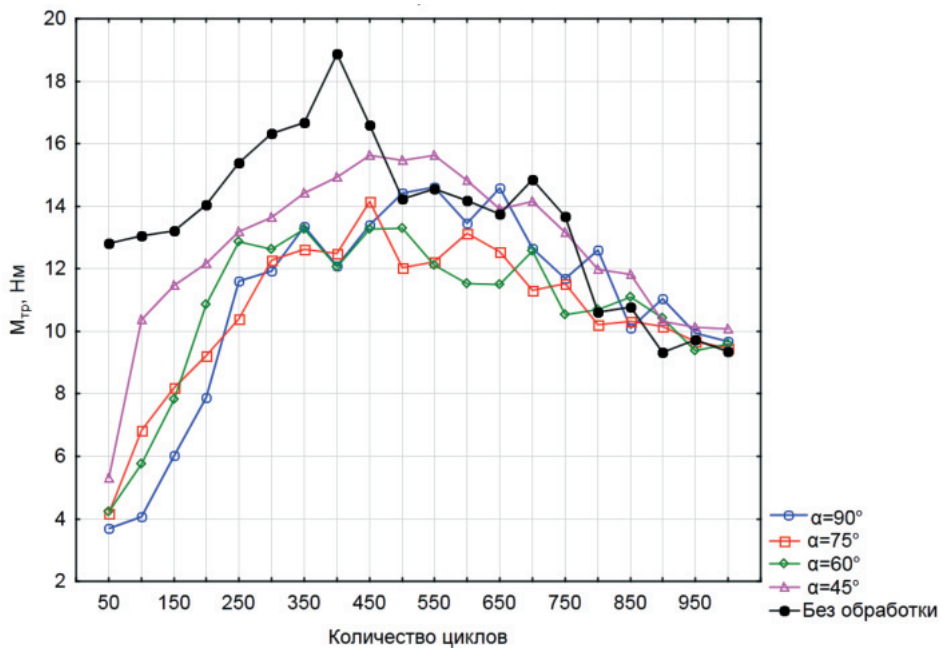


Рис. 10. Динамика изнашивания образцов, полученных при различных углах наклона рабочего инструмента α

Fig. 10. Wear dynamics of samples obtained at different working tool inclination angles α

Наибольшие моменты трения наблюдаются при изнашивании поверхностного слоя, что соответствуют периоду приработки для определенных условий трения. При формировании на образцах равновесной шероховатости момент трения $M_{тр}$ начинает снижаться.

Наибольший момент трения $M_{тр}$ наблюдался у образца без обработки ППД. У образцов, обработанных ППД с различными углами наклона рабочего инструмента α, регистрировался значительно меньший $M_{тр}$, что указывает на снижение износа. После достижения глубины износа образцов, соответствующей глубине деформированного слоя, процесс стабилизируется и при продолжительности 850…1000 циклов динамика изменения момента трения $M_{тр}$ становится схожей для всех образцов.

До и после испытаний на трение образцы взвешивались. С уменьшением угла наклона колебательной системы величина износа по массе увеличивалась. Наименьший износ (0,146 г) зафиксирован у образцов, обработанных при угле наклона α = 90°. При углах α, равных 75°, 60° и 45°, изменение массы составило соответственно 0,195, 0,178 и 0,231 г.

Выводы

Проведенные исследования по влиянию ультразвукового поверхностного пластического деформирования с различными углами наклона рабочего инструмента на свойства поверхности образцов из стали 45 позволили выявить особенности этого технологического приема.

Исследования показали, что на контролируемые в исследовании характеристики поверхностного слоя угол наклона рабочего инструмента оказывает различное влияние.

Ультразвуковое ППД на выбранных режимах обработки позволяет снизить высотные параметры шероховатости до 6–7 раз, шаговые – до 3 раз, а также повысить относительную опорную длину профиля до 4 раз. Причем лучшие результаты достигнуты при угле наклона α = 45°.

Наибольшая глубина наклепанного слоя достигается при α = 90° и при выбранных режимах обработки составляет 345 мкм. С уменьшением угла α нормальная составляющая силы взаимодействия инструмента с заготовкой уменьшается, соответственно уменьшается и наклёп. Наименьший износ наблюдается также при большей глубине наклёпа.

На основании проведенных исследований можно констатировать, что выбор угла наклона колебательной системы осуществляется на основании требований к получаемому поверхностному слою. В случаях, когда требуется получить наименьшие значения параметров шероховатости, целесообразна установка угла наклона α = 45°…60°. Наибольшая глубина деформированного слоя и, как следствие, большая износостойкость достигается при α = 75°…90°.

Поскольку, как отмечалось, наиболее значимыми факторами являются подача и усилие прижима, то полученные результаты могут быть использованы при обработке криволинейных поверхностей деталей, в частности, полученных аддитивными технологиями. В таких случаях ультразвуковое оборудование устанавливается на станок, обеспечивающий требуемую стратегию перемещения рабочего инструмента, при этом наиболее рациональным технологическим приемом является регулирование угла наклона колебательной системы в процессе обработки.

Список литературы

1. *Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I.* A mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high-temperature creep conditions // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2016. – Vol. 1. – P. 93–112. – DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07.

2. *Крылова Н.А., Шуваев В.Г.* Обеспечение надежности и качества поверхностей деталей ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием // Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 205–206. – EDN YAFGEH.

3. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. – М.: Янус-К, 2006. – 687 с. – ISBN 5-8037-0314-1. – EDN QNBJAF.

4. Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation / F. Bai, K.-A. Saalbach, L. Wang, X. Wang, J. Twiefel // Ultrasonics. – 2018. – Vol. 84. – P. 350–355. – DOI: 10.1016/j.ultras.2017.12.001.

5. Effects of ultrasonic surface rolling on fretting wear behaviors of a novel 25CrNi2MoV steel / Y. Zhang, L. Huang, F. Lu, S. Qu, V. Ji, X. Hu, H. Liu // Materials Letters. – 2021. – Vol. 284 (2) – P. 128955. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128955.

6. Microstructure and mechanical properties of additively manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloys after ultrasonic surface rolling process / Z. Cui, Y. Mi, D. Qiu, P. Dong, Z. Qin, D. Gong, W. Li // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 887. – P. 161393. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161393.

7. The influence of ultrasonic surface rolling on the fatigue and wear properties of 23-8N engine valve steel / F. Lai, S. Qu, R. Lewis, T. Slatter, W. Fu, X. Li // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 125. – P. 299–313. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.010.

8. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 3 / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

9. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / под ред. А.И. Манохина. – М.: Наука, 1986. – 277 с.

10. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. – ISBN 978-5-907104-23-5. – EDN WNWHDF.

11. Effects of the different frequencies and loads of ultrasonic surface rolling on surface mechanical properties and fretting wear resistance of HIP Ti–6Al–4V alloy / G. Li, S.G. Qu, Y.X. Pan, X.Q. Li // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 389. – P. 324–334. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.120.

12. Effect of ultrasonic surface rolling at low temperatures on surface layer microstructure and properties of HIP Ti-6Al-4V alloy / G. Li, S. Qu, M.X. Xie, X. Li // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 316. – P. 75–84. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.099.

13. Effect of multi-pass ultrasonic surface rolling on the mechanical and fatigue properties of HIP Ti-6Al-4V alloy / G. Li, S. Qu, M. Xie, Z. Ren, X. Li // Materials. – 2017. – Vol. 10. – P. 133. DOI: 10.3390/ma10020133.

14. Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening / X. Luan, W. Zhao, Z. Liang, S. Xiao, G. Liang, Y. Chen, S. Zou, X. Wang // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 392. – P. 125745. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125745.

15. The effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on low temperature nitriding of ultra-high strength steel / W. Zhao, D. Liu, H. Qin, X. Zhang, H. Zhang, R. Zhang, Z. Ren, C. Ma, A. Amanov, Y.-S. Pyun, G.L. Doll, Y. Dong, C. Ye // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 375. – P. 205–214. – DOI: 0.1016/j.surfcoat.2019.07.006.

16. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing / W. Ting, W. Dongpo, L. Gang, G. Baoming, S. Ningxia // Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 255 (5). – P. 1824–1829. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.034.

17. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications / M. John, A.M. Ralls, S.C. Dooley, A.K.V. Thazhathidathil, A.K. Perka,

U.B. Kuruveri, P.L. Menezes // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11 (22). – P. 10986. – DOI: 10.3390/app112210986.

18. Применение ультразвука при сборочно-разборочных операциях / В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, А.Н. Неверов, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько. – М.: Техполиграфцентр, 2008. – 145 с. – ISBN 978-5-94385-040-0. – EDN QNCHIX.

19. *Приходько В.М.* Ультразвуковые технологии при производстве и ремонте автотракторной техники. – М.: Техполиграфцентр, 2000. – 252 с. – ISBN 5-900095-16-9.

20. *Cao X.J., Pyoun Y.S., Murakami R.* Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification // Applied Surface Science. – 2010. – Vol. 256 (21). – P. 6297–6303. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.04.007.

21. *Муханов И.И., Голубев Ю.М.* Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой // Вестник машиностроения. – 1966. – № 11. – С. 52–53.

22. Авторское свидетельство № 456704 А1 СССР, МПК В23Р 1/18. Способ поверхностного упрочнения: № 1718835: заявл. 29.11.1971: опубл. 15.01.1975 / И.А. Стебельков; заявитель Предприятие П/Я Г-4561. – EDN DXTPEB.

23. Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования / Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, С.К. Сундуков, А.В. Сухов, Д.С. Фатюхин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 33–39. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39. – EDN EGTURS.

24. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool / R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, G. Gomez-Gras, J. Lluma-Fuentes // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 257. – P. 203–212. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.036.

25. Influence of surface ultrasonic rolling on microstructure and corrosion property of T4003 ferritic stainless steel welded joint / P. Liu, R. Yu, X. Gao, G. Zhang // Metals. – 2020. – Vol. 10. – P. 1081. – DOI: 10.3390/met10081081.

26. Enhanced wear resistance of 316 L stainless steel with a nanostructured surface layer prepared by ultrasonic surface rolling / C. Wang, J. Han, J. Zhao, Y. Song, J. Man, H. Zhu, J. Sun, L. Fang // Coatings. – 2019. – Vol. 9. – P. 276. – DOI: 10.3390/coatings9040276.

27. Optimizing the parameters of ultrasonic surface plastic deformation by a free steel indenter / R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, S.K. Sundukov, A.V. Sukhov, D.S. Fatyukhin // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42 (11). – P. 1195–1198. – DOI: 10.3103/S1068798X22110181.

28. Выбор и оптимизация режимов ультразвукового поверхностного деформирования / В.Ф. Казанцев, Ю.М. Лужнов, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4 (47). – С. 26–32. – EDN XDBUGV.

29. Упрочнение поверхностного слоя деталей машин методами химико-термической обработки и ультразвуковыми технологиями / Л.Н. Бритвин, В.А. Германова, В.И. Карагодин, Р.И. Нигметзянов, Д.С. Фатюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 1 (48). – С. 63–67. – EDN YGTWIP.

30. Sequential treatment of steel surfaces by nitriding and ultrasonic hardening / S.K. Sundukov, R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, D.S. Fatyukhin // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 484–489. – DOI: 10.4028/p-vz1gn6. – EDN IZHMOF.

31. Hybrid technology for surface hardening of structural steel / O.V. Chudina, V.M. Prikhod'ko, D.S. Simonov, P. Bringulis // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42 (11). – P. 1192–1194. – DOI: 10.3103/s1068798x22110065. – EDN PWBBGV.

32. Effective combined surface hardening processes of structural steels using ultrasound / O. Chudina, D. Simonov, T. Simonova, A. Litovchenko // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – P. 06024. – DOI: 10.1051/e3sconf/202343106024.

33. *Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F.* The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing // Progress in Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. 2. – P. 31–41. – DOI: 10.1007/s40964-017-0017-z.

34. Enhancement of the microstructure and fatigue crack growth performance of additive manufactured titanium alloy parts by laser-assisted ultrasonic vibration processing / S.A. Ojo, K. Manigandan, G.N. Morscher, A.L. Gyekenyesi // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2024. – Vol. 33. – P. 10345–10359. – DOI: 10.1007/s11665-024-09323-8.

35. Surface properties of additively manufactured 316L steel subjected to ultrasonic rolling / Q. Xu, Z. Qiu, D. Jiang, G. Cai, X. Yang, J. Liu, G. Li // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2024. – P. 1–10. – DOI: 10.1007/s11665-024-09173-4.

36. Effects of ultrasonic impact treatment on the stress-controlled fatigue performance of additively manufactured DMLS Ti-6Al-4V alloy / P. Walker, S. Malz, E. Trudel, S. Nosir, M.S.A. ElSayed, L. Kok //

Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9 (22). – P. 4787. – DOI: 10.3390/app9224787

37. Comprehensive estimation of changes in the microgeometry of steel 45 by ultrasonic plastic deformation with a free deforming element / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, A.V. Sukhov, S.K. Sundukov // Metals. – 2023. – Vol. 13 (1). – P. 114. – DOI: 10.3390/met13010114. – EDN VTASEF.

38. Машина трения универсальная МТУ-01. ТУ 32.99.53-001-78940767-2018. Руководство по эксплуатации. – ООО «Продвинутые технологии», 2023. – 18 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

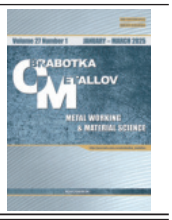
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 77–92
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Influence of the oscillating systems inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation

Dmitry Fatyukhin [a], ***Ravil Nigmetzyanov*** [b], ***Vyacheslav Prikhodko*** [c], ***Sergey Sundukov*** [d], ***Aleksandr Sukhov*** [e]

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-5914-3415, mitriy2@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0009-0008-1443-7584, lefmo@yandex.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-8261-0424, prikhodko@madi.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-4393-4471, sergey-lefmo@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0009-9097-8216, sukhov-aleksandr96@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 22 November 2024
Revised: 03 December 2024
Accepted: 03 February 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Ultrasound
Surface layer
Ultrasonic vibrations
Surface deformation
Roughness
Microhardness

Funding
This research was funded by the project of the Russian Science Foundation No. 24-19-00463, https://rscf.ru/project/24-19-00463/.

ABSTRACT

Introduction. Among the methods of modifying the surfaces of metal products to change the physical-mechanical and geometric properties of the surface layer, surface plastic deformation (*SPD*) methods are the most prevalent. Using ultrasound to enhance the efficiency of deformation processes allows for increase in microhardness and reduction in roughness compared to rolling and smoothing. The greatest technological challenges are caused by ultrasonic surface plastic deformation of curved surfaces, including those obtained by additive technologies. Given that most ultrasonic *SPD* methods are based on the longitudinal nature of vibrations, to ensure uniform processing of curved surfaces, the tool axis should be oriented at a specific angle relative to any point on the surface being processed. In this regard, **the purpose of the work** is to study the effect of the oscillating system inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation. This study examines steel 45 samples subjected to ultrasonic *SPD* at various oscillating system inclination angles: 90°, 75°, 60°, and 45°. **Methods.** The research methods included metallographic studies of the surface layer microstructure of the samples, measurement of its microhardness and roughness, as well as comparative wear tests. **Results and discussion.** Ultrasonic surface deformation, at any of the considered tool inclination angles **α**, creates a hardened layer – from 30 μm at **α** = 45° to 350 μm at **α** = 90 °. In this case, the microhardness increases to 240 HV at **α** = 45°. Furthermore, at any **α**, there is a significant decrease in roughness. For example, altitude parameters are reduced by more than 8 times. The best results were achieved at **α** = 60°. The wear test results indicated a substantial reduction in weight loss due to wear following ultrasonic processing. The most significant decrease in wear (more than twofold) was observed at an inclination angle of **α** = 90°.

For citation: Fatyukhin D.S., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V. Influence of the oscillating systems inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 77–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92. (In Russian).

References

1. Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I. A mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high-temperature creep conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, vol. 1, pp. 93–112. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07.

2. Krylova N.A., Shuvaev V.G. Obespechenie nadezhnosti i kachestva poverkhnostei detalei ul'trazvukovym poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Ensuring the reliability and quality of surfaces of parts by ultrasonic surface plastic deformation]. *Nadezhnost' i kachestvo = Reliability and Quality*, 2018, vol. 2, pp. 205–206.

*** Corresponding author**
Fatyukhin Dmitriy S., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University (MADI),
64 Leningradsky prospect,
125319, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 968 868-60-73, **e-mail:** mitriy2@yandex.ru

3. Abramov O.V., Prikhod'ko V.M., ed. *Moshchnyi ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroenii* [Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering], Moscow, Yanus-K Publ., 2006. 687 p. ISBN 5-8037-0314-1.

4. Bai F., Saalbach K.-A., Wang L., Wang X., Twiefel J. Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation, *Ultrasonics*, 2018, vol. 84, pp. 350–355. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.12.001.

5. Zhang Y., Huang L., Lu F., Qu S., Ji V., Hu X., Liu H. Effects of ultrasonic surface rolling on fretting wear behaviors of a novel 25CrNi2MoV steel. *Materials Letters*, 2021, vol. 284 (2), p. 128955. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128955.

6. Cui Z., Mi Y., Qiu D., Dong P., Qin Z., Gong D., Li W. Microstructure and mechanical properties of additively manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloys after ultrasonic surface rolling process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 887, pp. 161393. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161393.

7. Lai F., Qu S., Lewis R., Slatter T., Fu W., Li X. The influence of ultrasonic surface rolling on the fatigue and wear properties of 23-8N engine valve steel. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 125, pp. 299–313. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.010.

8. Rosenberg L.D., ed. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. Kn. 3 [Physics and technology of powerful ultrasound. Vol. 3]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 689 p.

9. Manokhin A.I., ed. *Vozdeistvie moshchnogo ul'trazvuka na mezhfaznuyu poverkhnost' metallov* [The effect of powerful ultrasound on the interphase surface of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 277 p.

10. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [Technologist's handbook]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p. ISBN 978-5-907104-23-5.

11. Li G., Qu S.G., Pan Y.X., Li X.Q. Effects of the different frequencies and loads of ultrasonic surface rolling on surface mechanical properties and fretting wear resistance of HIP Ti–6Al–4V alloy. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 389, pp. 324–334. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.120.

12. Li G., Qu S., Xie M.M., Li X. Effect of ultrasonic surface rolling at low temperatures on surface layer microstructure and properties of HIP Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 316, pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.099.

13. Li G., Qu S., Xie M., Ren Z., Li X. Effect of multi-pass ultrasonic surface rolling on the mechanical and fatigue properties of HIP Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 2017, vol. 10, p. 133. DOI: 10.3390/ma10020133.

14. Luan X., Zhao W., Liang Z., Xiao S., Liang G., Chen Y., Zou S., Wang X. Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 392, p. 125745. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125745.

15. Zhao W., Liu D., Qin H., Zhang X., Zhang H., Zhang R., Ren Z., Ma C., Amanov A., Pyun Y.-S., Doll G.L., Dong Y., Ye C. The effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on low temperature nitriding of ultra-high strength steel. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 375, pp. 205–214. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.006.

16. Ting W., Dongpo W., Gang L., Baoming G., Ningxia S. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 255 (5), pp. 1824–1829. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.034.

17. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., Menezes P.L. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11 (22), p. 10986. DOI: 10.3390/app112210986.

18. Kazantsev V.F., Kudryashov B.A., Neverov A.N., Nigmetzyanov R.I., Prikhod'ko V.M. *Primenenie ul'trazvuka pri sborochno-razborochnykh operatsiyakh* [The use of ultrasound in assembly and disassembly operations]. Moscow, Tekhpoligraftsentr Publ., 2008. 145 p. ISBN 978-5-94385-040-0.

19. Prikhod'ko V.M. *Ul'trazvukovye tekhnologii pri proizvodstve i remonte avtotraktornoi tekhniki* [Ultrasonic technologies in the production and repair of automotive equipment]. Moscow, Tekhpoligraftsentr Publ., 2000. 252 p. ISBN 5-900095-16-9.

20. Cao X.J., Pyoun Y.S., Murakami R. Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*, 2010, vol. 256 (21), pp. 6297–6303. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.04.007.

21. Mukhanov I.I., Golubev Yu.M. Uprochnenie stal'nykh detalei sharikom, vibriruyushchim s ul'trazvukovoi chastotoi [Hardening of steel parts with a ball vibrating at ultrasonic frequency]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1966, vol. 11, pp. 52–53. (In Russian).

22. Stebel'kov I.A. *Sposob poverkhnostnogo uprochneniya* [Surface hardening method]. Inventor's Certificate USSR, no. 456704, 1975.

23. Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Sposoby ul'trazvukovogo poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Methods of ultrasonic surface plastic deformation]. *Naukoemkie*

tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, vol. 7 (133), pp. 33–39. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39.

24. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J.A., Gómez-Gras G., Llumà-Fuentes J. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 257, pp. 203–212. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.036.

25. Liu P., Yu R., Gao X., Zhang G. Influence of surface ultrasonic rolling on microstructure and corrosion property of T4003 ferritic stainless steel welded joint. *Metals*, 2020, vol. 10, p. 1081. DOI: 10.3390/met10081081.

26. Wang C., Han J., Zhao J., Song Y., Man J., Zhu H., Sun J., Fang L. Enhanced wear resistance of 316 L stainless steel with a nanostructured surface layer prepared by ultrasonic surface rolling. *Coatings*, 2019, vol. 9, p. 276. DOI: 10.3390/coatings9040276.

27. Nigmetzyanov R.I., Prikhod'ko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Optimizing the parameters of ultrasonic surface plastic deformation by a free steel indenter. *Russian Engineering Research*, 2022, vol. 42 (11), pp. 1195–1198. DOI: 10.3103/s1068798x22110181.

28. Kazantsev V.F., Luzhnov Yu.M., Nigmetzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Vybor i optimizatsiya rezhimov ul'trazvukovogo poverkhnostnogo deformirovaniya [Selection and optimization of ultrasonic surface deformation modes]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) = Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2016, vol. 4 (47), pp. 26–32.

29. Britvin L.N., Germanova V.A., Karagodin V.I., Nigmetzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Uprochnenie poverkhnostnogo sloya detalei mashin metodami khimiko-termicheskoi obrabotki i ul'trazvukovymi tekhnologiyami [Hardening of the surface layer of machine parts using chemical-thermal treatment methods and ultrasonic technologies]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) = Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2017, vol. 1 (48), pp. 63–67.

30. Sundukov S.K., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Fatyukhin D.S. Sequential treatment of steel surfaces by nitriding and ultrasonic hardening. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 484–489. DOI: 10.4028/p-vz1gn6.

31. Chudina O.V., Prikhod'ko V.M., Simonov D.S., Bringulis P. Hybrid technology for surface hardening of structural steel. *Russian Engineering Research*, 2022, Vol. 42 (11), pp. 1192–1194. DOI: 10.3103/s1068798x22110065.

32. Chudina O., Simonov D., Simonova T., Litovchenko A. Effective combined surface hardening processes of structural steels using ultrasound. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 431, p. 06024. DOI: 10.1051/e3sconf/202343106024.

33. Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2017, vol. 2, pp. 31–41. DOI: 10.1007/s40964-017-0017-z.

34. Ojo S.A., Manigandan K., Morscher G.N., Gyekenyesi A.L. Enhancement of the microstructure and fatigue crack growth performance of additive manufactured titanium alloy parts by laser-assisted ultrasonic vibration processing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 33, pp. 10345–10359. DOI: 10.1007/s11665-024-09323-8.

35. Xu Q., Qiu Z., Jiang D., Cai G., Yang X., Liu J., Li G. Surface properties of additively manufactured 316L steel subjected to ultrasonic rolling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s11665-024-09173-4.

36. Walker P., Malz S., Trudel E., Nosir S., ElSayed M.S.A., Kok L. Effects of ultrasonic impact treatment on the stress-controlled fatigue performance of additively manufactured DMLS Ti-6Al-4V alloy. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (22), p. 4787. DOI: 10.3390/app9224787.

37. Fatyukhin D.S., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. Comprehensive estimation of changes in the microgeometry of steel 45 by ultrasonic plastic deformation with a free deforming element. *Metals*, 2023, vol. 13 (1), p. 114. DOI: 10.3390/met13010114.

38. *Universal friction machine MTU-01. TU 32.99.53-001-78940767-2018*. Operation manual. LLC Advanced Technologies Publ., 2023. 18 p. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

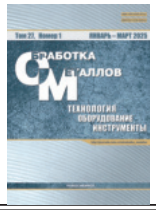
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 93–105
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования

Михаил Борисов [1, a], ***Дмитрий Лобанов*** [1, b, *], ***Вадим Скиба*** [2, c], ***Оксана Надеждина*** [1, d]

[1] Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, 428015, Россия
[2] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-9084-1820, borisovmgou@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru; [d] https://orcid.org/0009-0006-3656-394X, nadezhdina_oksana@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047

История статьи:
Поступила: 26 ноября 2024
Рецензирование: 12 декабря 2024
Принята к печати: 28 декабря 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Электрохимическое шлифование
Комбинированная обработка
Моделирование
Абразивный инструмент
Гибридная технология

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_25.

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. При изготовлении ответственных деталей из высокопрочных и труднообрабатываемых сталей в различных отраслях промышленности окончательное качество обычно формируется на операциях финишной обработки. Эффективность процесса значительно выше при использовании комбинированных, гибридных методов воздействия на обрабатываемую поверхность. При обработке некоторых фасонных деталей сложной формы больше внимания на финишных операциях, как правило, уделяется уменьшению шероховатости с соблюдением ранее достигнутых показателей размерной точности. Для этого зачастую используют абразивные инструменты на жесткой основе, размещая их в менее жесткой технологической системе. Для повышения эффективности процесса необходимо установить оптимальные режимы механической и электрохимической обработки деталей. При отсутствии возможности использования на начальном этапе промышленного оборудования для гибридных технологий, с учетом необходимости проведения модернизации имеющегося технологического оборудования для осуществления процесса электрохимического шлифования, целесообразно исследование указанного процесса производить путем его моделирования на устройствах-имитаторах. **Цель работы:** разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке. **Методика исследований.** Для моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке нами было разработано специальное устройство. Оно позволяет производить базирование заготовки, инструмента, реализовывать процесс электрохимического шлифования, его кинематические и электрические условия – главное движение, линейное перемещение рабочих органов, механические и электрические режимы, а также позволяет обеспечить необходимые условия для реализации технологии и реализовать систему управления. **Результаты и обсуждение.** Для определения влияния механических режимов резания на шероховатость обработанной поверхности образца детали, изготовленного из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, проведены эмпирические исследования на спроектированном устройстве. Планирование и обработка результатов экспериментов выполнялись с использованием стандартной методики подготовки и проведения полного факторного эксперимента. Полученная модель позволяет определить рациональные механические режимы резания и оценить их влияние на качество обрабатываемой поверхности.

Для цитирования: Разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, О.А. Надеждина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 93–105. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105.

Введение

При изготовлении ответственных деталей из высокопрочных и труднообрабатываемых сталей в различных отраслях промышленности окончательное качество формируется, как правило, на операциях финишной обработки. Зачастую такие детали функционируют в специфичных условиях их эксплуатации. Учитывая это обсто-

***Адрес для переписки**
Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
пр. Московский, 15,
428015, г. Чебоксары, Россия
Тел.: +7 908-303-47-45, **e-mail:** lobanovdv@list.ru

ятельство, детали изготовляют из труднообрабатываемых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов на основе титана и никеля. При наличии требования минимизации массы изделий многие детали являются тонкостенными и сложнопрофильными.

На финальном этапе технологического процесса механической обработки для достижения требуемого качества обрабатываемых поверхностей необходимо минимизировать силовые и тепловые процессы в контактной зоне между заготовкой и абразивным инструментом.

Такие требования накладывают ограничения на выбор методов и условий финишной обработки. Эффективность процесса значительно выше при использовании комбинированных, гибридных методов воздействия на обрабатываемую поверхность [1–19].

При обработке некоторых фасонных деталей сложной формы больше внимания на финишных операциях, как правило, уделяется уменьшению шероховатости с соблюдением ранее достигнутых показателей размерной точности. Для этого зачастую используют абразивные инструменты на жесткой основе (абразивные головки на металлической связке), размещая их в менее жесткой технологической системе.

Правка инструмента может осуществляться электрохимическим способом непрерывно с использованием дополнительной электрической цепи или без ее использования периодически. Подача чередующихся с определенным интервалом импульсов тока обратной полярности производится непосредственно в рабочую цепь. Для повышения эффективности процесса необходимо установить оптимальные режимы механической и электрохимической обработки деталей [20–27]. При отсутствии возможности использования на начальном этапе промышленного оборудования для гибридных технологий, с учетом необходимости проведения модернизации имеющегося технологического оборудования для осуществления процесса электрохимического шлифования, целесообразно исследование указанного процесса производить путем его моделирования на устройствах-имитаторах [28–31].

Цель работы состоит в разработке устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие ***задачи***.

1. На основе моделирования выявить рабочие параметры исследуемой системы и применимость устройства для исследования шероховатости обрабатываемых деталей в процессе электрохимического шлифования абразивными головками на металлической связке.

2. Провести эмпирические исследования шероховатости обрабатываемых поверхностей в зависимости от режимов электрохимического шлифования.

3. Обосновать возможность применения разработанного устройства для исследования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке.

Методика исследований

Для моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке нами было разработано специальное устройство, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Предлагаемое устройство позволяет производить базирование заготовки, инструмента, реализовывать процесс электрохимического шлифования, его кинематические и электрические условия – главное движение, линейное перемещение рабочих органов, механические и электрические режимы, а также позволяет обеспечить необходимые условия для реализации технологии (электролит и его подачу в зону обработки) и реализовать систему управления.

Для определения модели гравера, придающего вращательное движение абразивной головке, и привода линейного перемещения абразивной головки были рассчитаны силы резания и мощность резания. Режимы абразивного шлифования выбраны в соответствии с режимами, которые применялись при исследовании гибридной технологии электрохимической обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т алмазной цилиндрической головкой с диаметром рабочей части

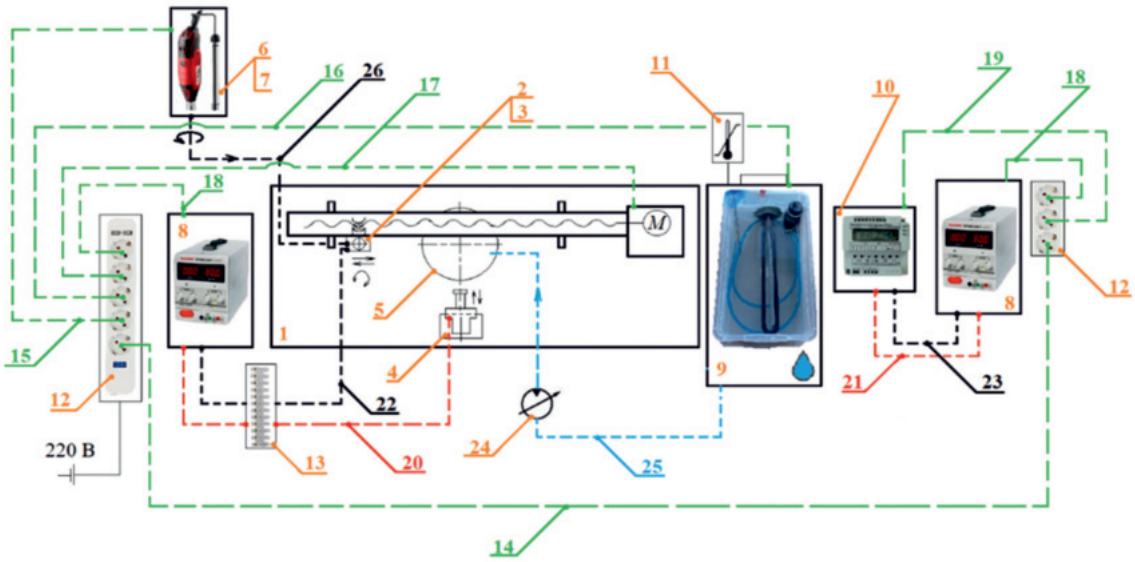


Рис. 1. Структурная схема устройства для моделирования процесса электрохимического шлифования:

1 – корпус устройства; *2* – цанговый механизм гравера; *3* – абразивная головка; *4* – приспособление для закрепления детали; *5* – емкость для электролита; *6* – гравер; *7* – штатив гравера; *8* – источник постоянного тока; *9* – емкость для электролита; *10* – реле времени; *11* – термометр; *12* – сетевой фильтр; *13* – колодка клеммная; *14* – сеть фильтра; *15* – сеть гравера; *16* – сеть электронагревателя; *17* – сеть двигателя привода линейного перемещения; *18* – сеть источника постоянного тока; *19* – сеть реле времени; *20* – сеть для подачи тока на деталь; *21* – сеть источника постоянного тока для реле времени; *22* – сеть для подачи тока на абразивную головку; *23* – сеть для подключения источника постоянного тока к реле времени; *24* – электронасос; *25* – линия подачи электролита; *26* – гибкий вал гравера

Fig. 1. Structural diagram of the device for simulating the electrochemical grinding process:

1 – device housing; *2* – collet mechanism of the engraver; *3* – abrasive head; *4* – part holding device; *5* – container for electrolyte; *6* – engraver; *7* – engraver stand; *8* – *DC* source; *9* – container for electrolyte; *10* – time relay; *11* – thermometer; *12* – surge protector; *13* – terminal block; *14* – filter electrical network; *15* – engraver electrical network; *16* – electric heater electrical network; *17* – linear motion drive motor electrical network; *18* – *DC* source electrical network; *19* – time relay electrical network; *20* – electrical network for supplying current to the part; *21* – *DC* source electrical network for a time relay; *22* – electrical network for supplying current to the abrasive head; *23* – electrical network for connecting a *DC* source to a time relay; *24* – electric pump; *25* – electrolyte supply line; *26* – flexible engraver shaft

3 мм и диаметром хвостовика 2 мм. Скорость резания от 4,7 до 6,05 м/с, глубина резания от 0,04 до 0,06 мм, продольная подача от 230 до 250 мм/мин [32]. В результате получили максимальные значения мощности резания 0,128 кВт. Дополнительно проведены расчеты деформации инструмента с использованием программного обеспечения ANSYS. Модель с граничными условиями для исследования приведена на рис. 2.

В табл. 1 приведены примеры расчета. Деформация инструмента составила от 0,14 до 0,23 мм.

На рис. 3 представлен общий вид привода линейного перемещения рабочего органа. Он служит для обеспечения продольной подачи инструмента и состоит из двигателя постоянного тока, передачи «винт – гайка» и ползуна.

В табл. 2 приведены технические характеристики привода линейного перемещения.

Для придания главного движения резания абразивной головке используется гравер «Зубр ЗГ-160ЭК», его технические характеристики приведены в табл. 3.

Для установки абразивной головки используется модернизированный под комбинированную технологию цанговый патрон, а для установки обрабатываемого образца – специальная оснастка, позволяющая реализовать поперечную подачу образца. Внешний вид рабочей зоны установки показан на рис. 4.

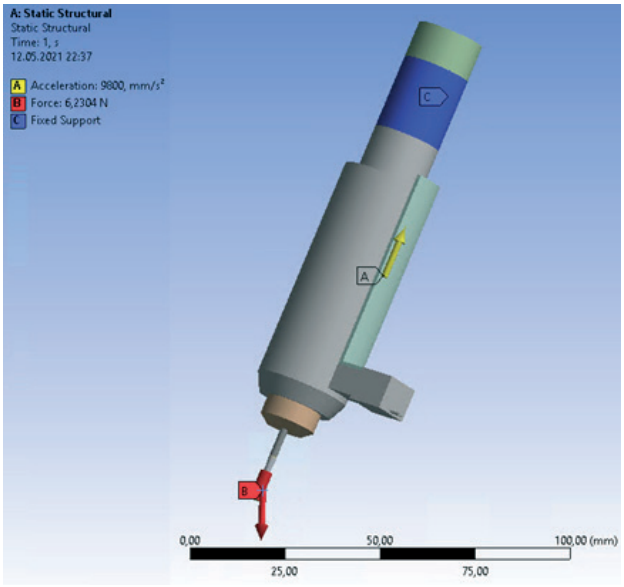
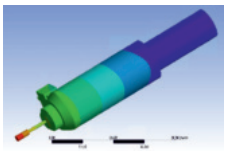
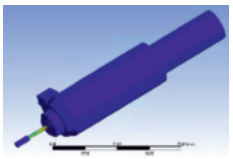
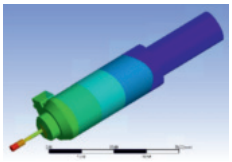
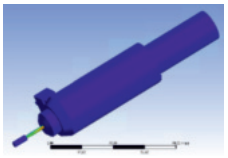


Рис. 2. Модель деформации инструмента с граничными условиями для исследования

Fig. 2. Tool deformation model with boundary conditions for analysis

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета деформации инструмента
Tool deformation calculation results

Режим резания / Cutting mode		Деформация инструмента, мм / Tool deformation, mm		Напряжение сдвига, МПа / Shear stress, MPa
V = 4,7 м/с, t = 0,04 мм, S = 230 мм/мин		0,14844		59,551
V = 6,05 м/с, t = 0,06 мм, S = 250 мм/мин		0,23082		92,426

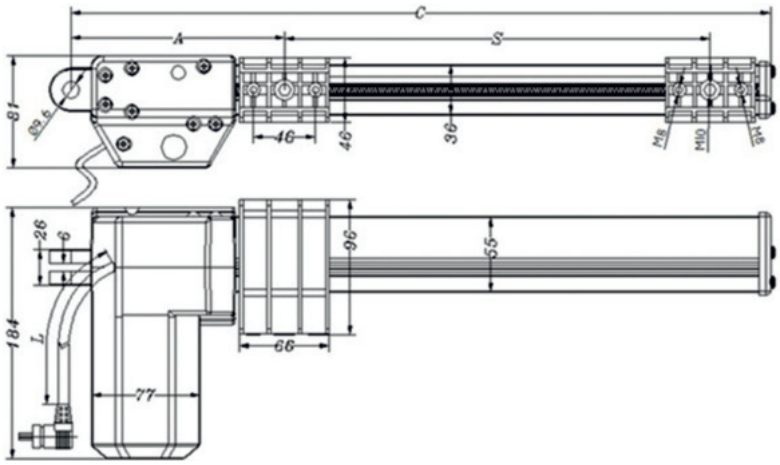


Рис. 3. Привод линейного перемещения:
C = 700 мм, A = 160 мм, S = 500 мм

Fig. 3. Linear drive:
C = 700 mm, A = 160 mm, S = 500 mm

Таблица 2
Table 2

Технические характеристики привода линейного перемещения
Linear drive specifications

Наименование / Name	Значение / Meaning
Входное напряжение, В / Input voltage, V	12
Грузоподъемность, Н / Load capacity, N	1500
Скорость перемещения ползуна минимальная, мм/с / Minimum slider travel speed, mm/s	4
Скорость перемещения ползуна максимальная, мм/с / Maximum slider travel speed, mm/s	36
Ход, мм / Stroke motion, mm	500

Таблица 3
Table 3

Технические характеристики гравера
Engraver specifications

Наименование / Name	Значение / Meaning
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	220
Частота, Гц / Frequency, Hz	50
Потребляемая мощность, Вт / Power consumption, W	160
Частота вращения, об/мин / Rotation speed, rpm	15 000…35 000
Диаметр цангового зажима, мм / Collet diameter, mm	2,4; 3,2
Масса, кг / Weight, kg	2,1

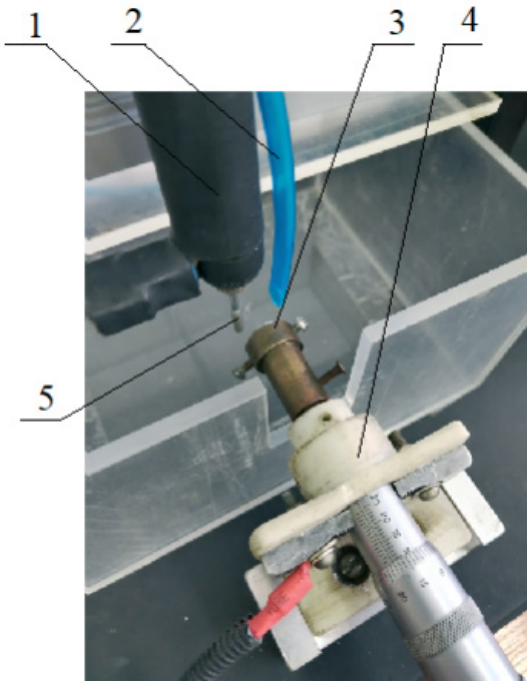


Рис. 4. Внешний вид рабочей зоны установки:
1 – модернизированный цанговый патрон; *2* – трубка для подачи электролита; *3* – обрабатываемый образец; *4* – оснастка для базирования и подачи образца; *5* – абразивная головка

Fig. 4. External view of the working area of the installation:
1 – upgraded collet chuck; *2* – electrolyte feed tube; *3* – sample being processed; *4* – sample basing and feed equipment; *5* – abrasive head

Патрон изолирован от гравера. Он устанавливается на ползуне привода движения подачи. Для передачи главного движения от гравера на патрон служит гибкий вал. Для базирования обрабатываемого экспериментального образца и реализации поперечной подачи (глубины резания t) используется специально спроектированная оснастка, изолированная от основного корпуса устройства.

Внешний вид устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования приведен на рис. 5.

Результаты и их обсуждение

Для определения влияния механических режимов резания на шероховатость обработанной поверхности образца детали, изготовленного из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, проведены эмпирические исследования на спроектированном устройстве. Электрические режимы и условия для реализации экспериментов при исследовании процесса электрохимического шлифования выбирались на основании предварительно проведенных экспериментов [32]: напряжение на источнике технологического тока 12 В, плотность тока травления 1,5 А/см^2, электролит на водной основе ($NaNO_3$ – 3 %, $NaNO_2$ – 1 %, Na_2CO_3 – 0,5 %).

Планирование и обработка результатов экспериментов проводились с использованием стандартной методики подготовки и проведения полного факторного эксперимента. Исходные данные для планирования и обработка результатов экспериментов представлены в табл. 4.

Полученное в результате обработки экспериментальных данных уравнение регрессии отражает зависимость шероховатости поверхности от механических режимов обработки и имеет следующий вид:

$$Ra = -2{,}67 + 106{,}17t - 0{,}43tS - 19{,}55tV + \\ + 0{,}013S - 0{,}004SV + 0{,}94V + 0{,}08tSV.$$

Полученная модель позволяет определить рациональные механические режимы резания и оценить их влияние на качество обрабатываемой поверхности. Частные случаи поверхностей отклика системы при постоянных значениях режимов резания в нулевом уровне варьирования приведены на рис. 6–8.

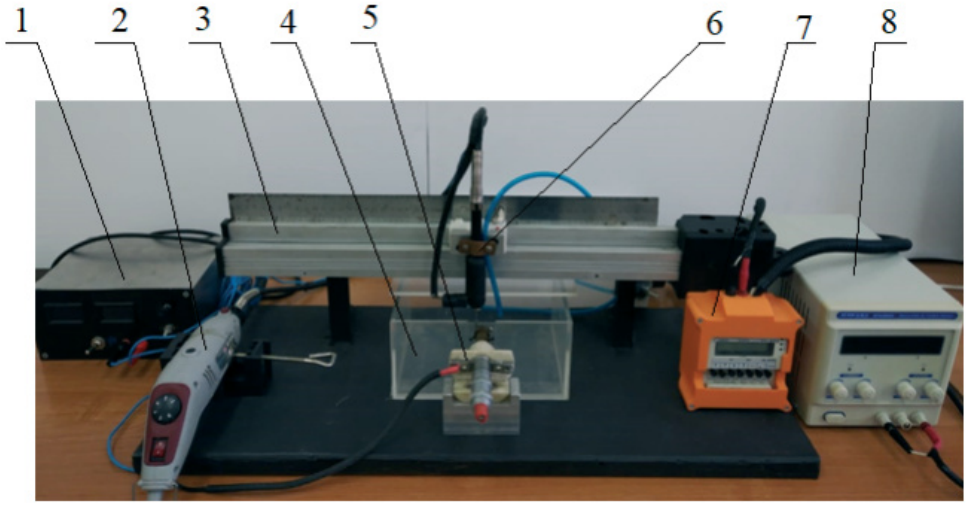


Рис. 5. Внешний вид устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования:

1 – источник тока для электрохимического процесса; *2* – гравер; *3* – привод линейного перемещения; *4* – емкость для электролита; *5* – оснастка для базирования и подачи образца; *6* – модернизированный цанговый патрон; *7* – реле времени; *8* – источник тока для электродвигателя привода линейного перемещения

Fig. 5. External view of the device for studying and simulating the electrochemical grinding process:

1 – current source for electrochemical process; *2* – engraver; *3* – linear drive; *4* – electrolyte container; *5* – sample basing and feeding equipment; *6* – upgraded collet chuck; *7* – time relay; *8* – current source for linear drive electric motor

Таблица 4
Table 4

Исходные данные для планирования и обработка результатов экспериментов
Initial data for planning and processing experimental results

Фактор / Factors	Уровень / Levels			Интервал варьирования / Variation interval
	Верхний / Upper $X_i = +1$	Основной (Нулевой) / Primary (Zero) $X_i = 0$	Нижний / Lower $X_i = -1$	
X_1 – глубина резания, t (мм) / X_1 – cutting depth, t (mm)	0,06	0,05	0,04	0,01
X_2 – подача, S (мм/мин) / X_2 – feed rate, S (mm/min)	250	240	230	10
X_3 – скорость резания V (м/с) / X_3 – cutting speed, V (m/s)	6	5	4	1

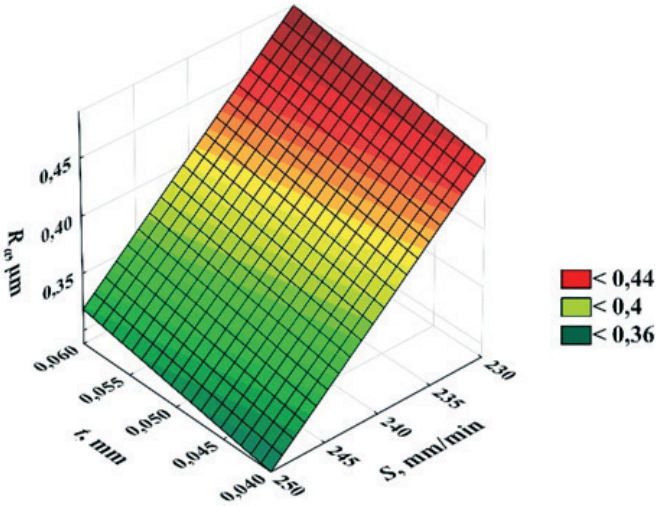


Рис. 6. Графики влияния подачи и глубины резания на шероховатость *Ra* обработанной поверхности стали 12Х18Н10Т при $V = 5$ м/с

Fig. 6. Graphs of the influence of feed rate and depth of cut on the surface roughness *Ra* of the machined *0.12 C-18 Cr-10 Ni-Ti* steel at $V = 5$ m/sec

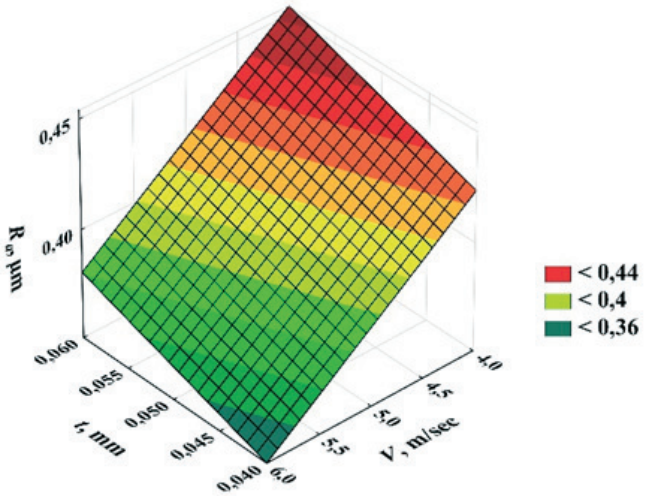


Рис. 7. Графики влияния скорости и глубины резания на шероховатость *Ra* обработанной поверхности стали 12Х18Н10Т при $S = 240$ мм/мин

Fig. 7. Graphs of the influence of cutting speed and depth of cut on the surface roughness *Ra* of the machined *0.12 C-18 Cr-10 Ni-Ti* steel at $S = 240$ mm/min

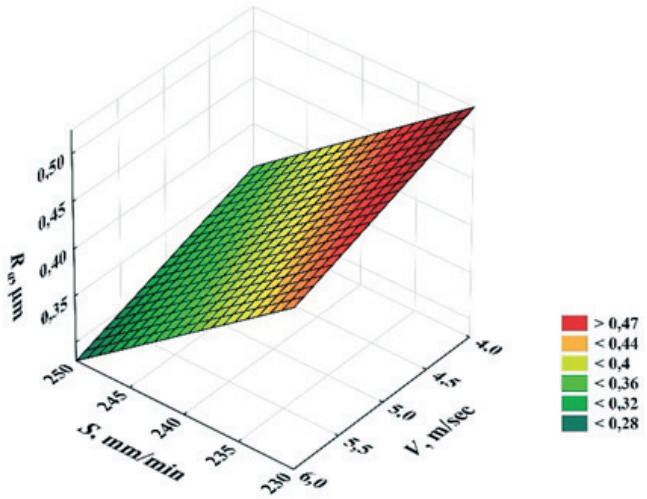


Рис. 8. Графики влияния скорости и подачи на шероховатость *Ra* обработанной поверхности стали 12Х18Н10Т при t = 0,05 мм

Fig. 8. Graphs of the influence of cutting speed and feed rate on the surface roughness *Ra* of the machined *0.12 C-18 Cr-10 Ni-Ti* steel at t = 0.05 mm

Полученная модель и поверхности отклика позволяют прогнозировать изменение шероховатости поверхности в зависимости от режимов шлифования и представляют собой эмпирическую модель рассматриваемой системы.

Выводы

1. Расчетами установлено, что при моделировании процесса обработки деталей из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 10 мм алмазной цилиндрической головкой с диаметром рабочей части 3 мм при изменении скорости резания от 4,7 до 6,05 м/с, глубины резания от 0,04 до 0,06 мм и продольной подачи от 230 до 250 мм/мин максимальное значение мощности резания составило 0,128 кВт, а максимальная деформация инструмента – 0,23 мм. Таким образом, разработанное устройство приемлемо для исследования зависимости качественных показателей обработанной поверхности от режимов резания. Для дальнейшего исследования параметров точности обработки жесткость системы следует увеличить.

2. Проведенные с использованием разработанного устройства исследования процесса электрохимического шлифования деталей из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 10 мм алмазной цилиндрической головкой с диаметром рабочей части 3 мм на указанных режимах резания позволили построить эмпирическую модель, позволяющую прогнозировать изменение шероховатости поверхности в зависимости от режимов электрохимического шлифования.

3. Теоретическими расчетами и практическими экспериментами подтверждено, что разработанное устройство применимо для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке.

Список литературы

1. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких 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.

2. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeeba // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.

3. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, А.А. Харченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 35–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.

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

5. *Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L.* The condition of machined surface of titanium alloy in dry grinding // International Conference on Indus-

trial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 May 2017. – St. Petersburg, 2017. – P. 115–120. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.446.

6. Analysis of grinding process with the use of field theory / V.V. Gusev, S.I. Roshchupkin, D.A. Moiseev, E.P. Melnikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 709 (2). – P. 022001. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022001.

7. *Реченко Д.С.* Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 18–25. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25.

8. Ultra-high-speed sharpening and hardening the coating of carbide metal-cutting tools for finishing aircraft parts made of titanium alloys / D.S. Rechenko, A.Y. Popov, Y.V. Titov, D.G. Balova, B.P. Gritsenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260 (6). – P. 062020. – DOI: 10.1088/1742-6596/1260/6/062020.

9. *Kozlov A.M., Kozlov A.A.* Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29 (7). – P. 743–746. – DOI: 10.3103/S1068798X09070223.

10. *Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu.* Predicting the supporting area of microrelief in machine parts of variable rigidity during plane grinding // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2006. – Vol. 35 (3). – P. 260–265.

11. Study on electrochemical effect in electrochemical grinding of tungsten alloy / L. Niu, Z. Jin, Z. Zhou, Z. Dong, X. Zhu // ISAAT 2018 – 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Toronto, 14–16 October 2018. – Toronto, ON, 2018.

12. *Братан С.М., Сидоров Д.Е., Богуцкий В.Б.* Синтез фильтра Калмана-Бюсси для оценивания состояния операции шлифования // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 14–15 сентября 2015 года. – Севастополь, 2015. – С. 87–91.

13. Испытательный комплекс на базе прецизионного профилешлифовального станка с ЧПУ CHEVALIER модели smart-B1224 III / В.А. Носенко, Р.А. Белухин, А.В. Фетисов, Л.К. Морозова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 5 (184). – С. 35–39.

14. *Гусев В.В., Моисеев Д.А.* Оценка параметров рабочей поверхности алмазного шлифовального круга // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 4 (59). – С. 11–17.

15. *Макаров В.Ф., Никитин С.П.* Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 4 (82). – С. 21–29.

16. *Макаров В.Ф., Жукотский В.А., Бычина Е.Н.* Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 52–55.

17. Патент № 2215641 C2 Российская Федерация, МПК B24B 49/00, G01L 5/00. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: № 2001116428/28: заявл. 13.06.2001: опубл. 10.11.2003 / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, В.В. Янпольский; заявитель Братский государственный технический университет.

18. Патент № 2210749 C2 Российская Федерация, МПК G01L 1/22, G01L 1/00, G01L 5/00. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: № 2001116429/28: заявл. 13.06.2001: опубл. 20.08.2003 / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, В.В. Янпольский; заявитель Братский государственный технический университет.

19. *Носенко В.А., Носенко С.В.* Технология шлифования металлов. – 4-е изд., стер. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2022. – 616 с.

20. Influence of the duration of current pulses on the roughness in the combined processing of corrosion steel 12H18N10T / D. Lobanov, M. Borisov, A. Yanyushkin, V. Skeeba // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 397–402. – DOI: 10.4028/p-gu270a.

21. *Zaborski S., Łupak M., Poroś D.* Wear of cathode in abrasive electrochemical grinding of hardly machined materials // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149 (1–3). – P. 414–418. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.015.

22. Diamond – ECM grinding of ceramic-metal tungsten / V.A. Mogilnikov, M.Y. Chmir, Y.S. Timofeev, V.S. Poluyanov // Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Leuven, 08–12 April 2013. – Leuven, 2013. – P. 407–409. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.104.

23. *Гусев В.В., Полтавец В.В., Молчанов А.Д.* Технологическое обеспечение обработки труднообрабатываемых материалов алмазным шлифованием за счет управления режущей способностью кругов // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 21–23 мая 2019 года. Т. 3. – Донецк, 2019. – С. 119–123.

24. Повышение качества абразивного электрохимического шлифования жаропрочных сплавов на никелевой основе / Р.Х. Ганцев, Д.В. Гундеров, В.В. Атрощенко, Л.А. Таймасова, М.В. Ватуев //

Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения. – Уфа, 2019. – Вып. 8 (13). – С. 322–326.

25. *Жетесова Г.С., Булатов Д.Ж.* Определение наиболее оптимальных параметров и условий электромеханической обработки // Труды Университета. – 2014. – № 1 (54). – С. 24–26.

26. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, П.В. Архипов, В.Ю. Попов // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 1 (5). – С. 132–138.

27. *Попов В.Ю., Янюшкин А.С.* Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1. – С. 306–308.

28. *Kozlov A.M., Ambrosimov S.K., Kozlov A.A.* Modeling abrasive grain interaction with machined surface // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), Sochi, Russia, 18–22 May 2020. – Springer, 2021. – P. 953–960. – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_110.

29. *Bratan S., Bogutsky B., Roshchupkin S.* Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018, Moscow, 15–18 May 2018. – Springer, 2019. – P. 1759–1769. – DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_189.

30. Investigation of the structure and properties of copper-tin bonding M2-01 in diamond grinding wheel introducing additional energy in the form of electric discharges into the processing zone / Y. Gutsalenko, S. Bratan, S. Roshchupkin, V. Dyadichev, S. Menyuk // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 11 (1). – P. 586–590. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.01.033.

31. *Козлов А.М., Болгов Д.В.* Моделирование совмещенной абразивной обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 2 (280). – С. 50–53.

32. Ways to implement hybrid finishing technology with a hand-held rotary tool / D. Lobanov, M. Borisov, A. Yanyushkin, V. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709 (4). – P. 044075. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044075.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

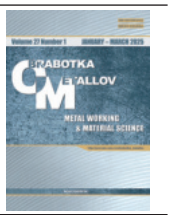
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 93–105
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Development of a device for studying and simulating the electrochemical grinding process

Mikhail Borisov [1, a], *Dmitry Lobanov* [1, b, *], *Vadim Skeeba* [2, c], *Oksana Nadezhdina* [1, d]

[1] I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation
[2] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-9084-1820, borisovmgou@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru; [d] https://orcid.org/0009-0006-3656-394X, nadezhdina_oksana@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 26 November 2024
Revised: 12 December 2024
Accepted: 28 December 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Electrochemical grinding
Combined processing
Modeling
Abrasive tool
Hybrid technology

Funding
This study was supported by a NSTU grant (project No. TP-PTM-1_25).

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. When manufacturing critical parts from high-strength and difficult-to-process steels in various industries, the final quality is usually formed during finishing operations. The efficiency of the process is significantly higher when using combined, hybrid methods of influencing the surface being processed. When processing some complex-shaped parts, more attention in finishing operations is usually paid to reducing roughness while maintaining previously achieved dimensional accuracy indicators. For this purpose, abrasive tools on a rigid base are often used, placing it in a less rigid technological system. To increase the efficiency of the process, it is necessary to establish optimal modes of mechanical and electrochemical processing of parts. In the absence of the possibility of using industrial equipment for hybrid technologies at the initial stage, taking into account the need to modernize existing technological equipment for the implementation of the electrochemical grinding process, it is advisable to study this process by simulating it on simulator devices. **The purpose of the work** is to develop a device for studying and simulating the process of electrochemical grinding of conductive parts with abrasive heads on a metal bond. **Research methodology.** To simulate the process of electrochemical grinding of conductive parts using abrasive heads on a metal bond, we have developed a special device. It allows for the basing of the workpiece and the tool, implementation the electrochemical grinding process, its kinematic and electrical conditions: main motion, linear displacement of working bodies, mechanical and electrical modes, ensuring the necessary conditions for the implementation of the technology, and implementing a control system. **Results and discussion**. To determine the influence of mechanical cutting modes on the roughness of the machined surface of a part made of corrosion-resistant steel *0.12 C-18Cr-10 Ni-Ti*, empirical studies were carried out on the designed device. Planning and processing of experimental results were carried out using standard methodology for preparing and conducting a full factorial experiment. The resulting model makes it possible to determine rational mechanical cutting conditions and evaluate its influence on the quality of the surface being processed.

For citation: Borisov M.A., Lobanov D.V., Skeeba V.Y., Nadezhdina O.A. Development of a device for studying and simulating the electrochemical grinding process. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 93–105. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105. (In Russian).

References

1. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeeba V.Yu. 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. (In Russian).

*** Corresponding author**
Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
I.N. Ulyanov Chuvash State University,
15 Moskovsky Ave,
428015, Cheboksary, Russian Federation
Тел.: +7 908 303-47-45, **e-mail:** lobanovdv@list.ru

2. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeeba V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 81–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.

3. Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.A. Analysis and synthesis of vibration isolation system of a grinding machine with account of the operational reliability of its elements. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 35–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49. (In Russian).

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

5. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L. The condition of machined surface of titanium alloy in dry grinding. *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017*, Saint-Petersburg, 16–19 May 2017, pp. 115–120. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.446.

6. Gusev V.V., Roshchupkin S.I., Moiseev D.A., Melnikova E.P. Analysis of grinding process with the use of field theory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 709 (2), p. 022001. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022001.

7. Rechenko D.S. The study of the process of difficult-to-machine materials cutting at the micro-level. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 18–25. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25. (In Russian).

8. Rechenko D.S., Popov A.Y., Titov Y.V., Balova D.G., Gritsenko B.P. Ultra-high-speed sharpening and hardening the coating of carbide metal-cutting tools for finishing aircraft parts made of titanium alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260 (6), p. 062020. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/6/062020.

9. Kozlov A.M., Kozlov A.A. Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29 (7), pp. 743–746. DOI: 10.3103/S1068798X09070223.

10. Soler Ya.I., Kazimirov Yu.D. Predicting the supporting area of microrelief in machine parts of variable rigidity during plane grinding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2006, vol. 35 (3), pp. 260–265.

11. Niu L., Jin Z., Zhou Z., Dong Z., Zhu X. Study on electrochemical effect in electrochemical grinding of tungsten alloy. *ISAAT 2018 – 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology*, Toronto, 14–16 October 2018.

12. Bratan S.M., Sidorov D.E., Bogutskii V.B. [Synthesis of a Kalman-Bussy filter for assessing the state of a grinding operation]. *Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii* [Modern directions and prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering]. Materials of the International Scientific and technical conference, Sevastopol, September 14–15, 2015, pp. 87–91. (In Russian).

13. Nosenko V.A., Belukhin R.A., Fetisov A.V., Morozova L.K. Ispytatel'nyi kompleks na baze pretsizionnogo profileshlifoval'nogo stanka s ChPU CHEVALIER modeli smart-B1224 III [Test complex based on a precision CNC profile grinding machine CHEVALIER model smart-B1224 III]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2016, no. 5 (184), pp. 35–39.

14. Gusev V.V., Moiseev D.A. Otsenka parametrov rabochei poverkhnosti almaznogo shlifoval'nogo kruga [Estimation of parameters of the working surface of a diamond grinding wheel]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*, 2017, no. 4 (59), pp. 11–17.

15. Makarov V.F., Nikitin S.P. Povyshenie effektivnosti profil'nogo glubinnogo shlifovaniya lopatok turbin na mnogokoordinatnykh stankakh s ChPU [Increasing the efficiency of profile deep-depth grinding of turbine blades on multi-axis CNC machines]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, no. 4 (82), pp. 21–29.

16. Makarov V.F., Zhukotsky V.A., Bychina E.N. Problemy avtomatizatsii finishnoi obrabotki slozhnoprofil'nykh poverkhnostei lopatok GTD [Problems of automation of finishing processing of difficult profile surfaces of blades GTE]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical Sciences*, 2016, no. 8-2, pp. 52–55.

17. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Sur'ev A.A., Yanpol'skii V.V. *Prisposoblenie dlya izmereniya malykh sil pri elektroalmaznom shlifovanii* [Device for measuring small forces during electric diamond grinding]. Patent RF, no. 2215641 C2, 2003.

18. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Sur'ev A.A., Yanpol'skii V.V. *Tenzometricheskaya vstavka dlya izmereniya malykh sil pri elektroalmaznom shlifovanii* [Strain gauge insert for measuring small forces during electric diamond grinding]. Patent RF, no. 2210749 C2, 2003.

19. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Metal grinding technology]. 4th ed. Staryi Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2022. 616 p.

20. Lobanov D., Borisov M., Yanyushkin A., Skeeba V. Influence of the duration of current pulses on the roughness in the combined processing of corrosion steel 12H18N10T. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 397–402. DOI: 10.4028/p-gu270a.

21. Zaborski S., Łupak M., Poroś D. Wear of cathode in abrasive electrochemical grinding of hardly machined materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149 (1–3), pp. 414–418. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.015.

22. Mogilnikov V.A., Chmir M.Y., Timofeev Y.S., Poluyanov V.S. Diamond – ECM grinding of ceramic-metal tungsten. *Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, Leuven, 08–12 April 2013, pp. 407–409. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.104.

23. Gusev V.V., Poltavets V.V., Molchanov A.D. [Technological support for processing hard-to-cut materials by diamond grinding by controlling the cutting ability of wheels]. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa* [Innovative prospects of Donbass]. Materials of the 5th International Scientific and Practical Conference, Donetsk, May 21–23, 2019. Donetsk, 2019, vol. 3, pp. 119–123. (In Russian).

24. Gantsev R.Kh., Gunderov D.V., Atroshchenko V.V., Taimasova L.A., Vatuev M.V. Povyshenie kachestva abrazivnogo elektrokhimicheskogo shlifovaniya zharoprochnykh splavov na nikelevoi osnove [Improving the quality of abrasive electrochemical grinding of nickel-based heat-resistant alloys]. *Neftegazovye tekhnologii i novye materialy. Problemy i resheniya* [Oil and gas technologies and new materials. Problems and solutions]. Ufa, 2019, iss. 8 (13), pp. 322–326.

25. Zhetesova G.S., Bulatov D.Zh. Opredelenie naibolee optimal'nykh parametrov i uslovii elektromekhanicheskoi obrabotki [Determination of the most optimal parameters and conditions for electromechanical processing]. *Trudy Universiteta = University Proceedings*, 2014, no. 1 (54), pp. 24–26.

26. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Arkhipov P.V., Popov V.Yu. Mekhanizm obrazovaniya zashchitnykh plenok na almaznykh krugakh s metallicheskoi svyazkoi [The mechanism of formation of protective films on diamond wheels with a metal bond]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 1 (5), pp. 132–138.

27. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Formirovanie poverkhnostnogo sloya rezhushchego instrumenta pri almaznoi obrabotke krugami na metallicheskoi svyazke [Developing a surface layer of cutting tools in diamond grinding wheels on a metal bond]. *Reshetnevskie chteniya = Reshetnev readings*, 2014, vol. 1, pp. 306–308.

28. Kozlov A.M., Ambrosimov S.K., Kozlov A.A. Modeling abrasive grain interaction with machined surface. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*, Sochi, Russia, 18–22 May 2020. Springer, 2021, pp. 953–960. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_110.

29. Bratan S., Bogutsky B., Roshchupkin S. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018*, Moscow, 15–18 May 2018. Springer, 2019, pp. 1759–1769. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_189.

30. Gutsalenko Y., Bratan S., Roshchupkin S., Dyadichev V., Menyuk S. Investigation of the structure and properties of copper-tin bonding M2-01 in diamond grinding wheel introducing additional energy in the form of electric discharges into the processing zone. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11 (1), pp. 586–590. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.01.033.

31. Kozlov A.M., Bolgov D.V. Modelirovanie sovmeshchennoi abrazivnoi obrabotki [Modelling of fetch abrasive filtering]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2010, no. 2 (280), pp. 50–53.

32. Lobanov D., Borisov M., Yanyushkin A., Skeeba V. Ways to implement hybrid finishing technology with a hand-held rotary tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709 (4), p. 044075. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044075.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

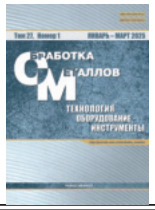
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 106–128
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-106-128

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Прогнозирование качества получаемой при резании металлов поверхности в условиях роста изношенности инструмента

Виктор Лапшин [a, *], ***Александра Губанова*** [b], ***Илья Дудинов*** [c]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-5114-0316, lapshin1917@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-9785-5384, anatoliya81@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0009-0009-0784-1287, ilya.sandman@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:
Поступила: 29 ноября 2024
Рецензирование: 19 декабря 2024
Принята к печати: 23 января 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Износ
Вибрации
Процесс резания
Качество поверхности

Финансирование
Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24–29–00287.

АННОТАЦИЯ

Введение. Важнейшим фактором, определяющим эффективность обработки металлов резанием, является качество получаемой при резании поверхности детали. Качество поверхности детали напрямую зависит от вибрационной активности режущего инструмента, амплитуда которой зависит от сложной эволюционной динамики процесса резания. С учетом этого современная технология цифрового двойника, которая позволяет рассчитывать на виртуальных моделях прогнозные значения качества получаемой поверхности деталей, становится крайне актуальным способом повышения эффективности в системах управления металлообработкой. **Цель работы:** повышение точности прогнозирования системой цифрового двойника качества получаемой при резании поверхности обрабатываемых деталей в условиях роста износа режущего инструмента. **В работе исследована** динамика процесса обработки на токарном станке деталей из металла, а также математическая модель, описывающая динамику вибраций инструмента в условиях обработки металлов на станках токарной группы с учетом влияния термодинамической подсистемы системы резания. **Методы исследования:** экспериментальный, на базе авторского измерительного стенда с привлечением следующего оборудования: современного металлографического инвертированного микроскопа «ЛабоМет-И», вариант 4, с широкоугольными объективами 5/20 с линейным полем зрения 20 мм; цифровой камеры для микроскопов Ucam-1400 с матрицей размером 1,4×1,4 мкм; контурографа-профилографа T4HD. Математическое моделирование динамической системы резания выполнялось в среде Matlab, для чего авторами разработана специальная программа обработки данных. **Результаты и обсуждение.** Построены кривые изнашиваемости режущего инструмента, изменения показателей качества обработанной поверхности в функциях пути резания, а также в функции износа режущего инструмента. Определены показатели динамики, по которым можно осуществлять параметрическую идентификацию виртуальных моделей цифрового двойника. Определена структура этих моделей и осуществлена параметрическая идентификация. Произведено численное моделирование в среде Matlab, по результатам которого построена кривая изменения среднеарифметического показателя шероховатости при росте износа режущего инструмента. Проведена оценка сходимости результатов натурного и численного экспериментов, которая показала высокую достоверность возможного прогноза качества получаемых при резании деталей системой цифрового двойника.

Для цитирования: *Лапшин В.П., Губанова А.А., Дудинов И.О.* Прогнозирование качества получаемой при резании металлов поверхности в условиях роста изношенности инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 106–128. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-106-128.

Введение

Как известно, повышение качества обработки металлических деталей на металлорежущих станках может быть достигнуто за счет повышения точности позиционирования или за счет снижения вибраций как режущего инструмента, так и самой заготовки, закрепленной в шпинделе станка [1]. Одним из важнейших факторов, определяющим качество получаемой при резании поверхности, является износ режущего инструмента. Наиболее опасна ситуация, когда инструмент достигает значений критического износа, после чего резко возрастает вибрационная активность режущего инструмента и, как следствие, снижается качество поверхности, получаемой при резании. Исходя из этих соображений, оценка вли-

***Адрес для переписки**
Лапшин Виктор Петрович, к.т.н., доцент
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1,
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тел.: +7 900 122-75-14, **e-mail:** lapshin1917@yandex.ru

яния износа режущего инструмента на качество получаемой при резании поверхности является актуальной научной задачей.

В современном представлении использование систем вибромониторинга позволяет, основываясь на цифровых измерениях вибраций, прогнозировать качество поверхности, получаемой при резании [2, 3]. Такой прогноз возможен только при условии разработки сложных математических моделей эволюционной динамики процессов, происходящих в процессе резания [4]. Сложность этих моделей и требование к их параметрической идентификации представляют собой проблему, решение которой значительно повысит возможности современных систем металлообработки. Одним из способов решения этой проблемы является использование новой цифровой парадигмы в системах управления металлообработкой, получившей название «цифровой двойник» [5–7]. В частности, подход, основанный на использовании интеллектуальных моделей, которые описывают сложную динамику технологических процессов, происходящих при резке металла, является наиболее перспективным в этой новой области научных знаний [8, 9]. Например, в работах, выполненных коллективами под руководством Y. Altintas – одного из известных специалистов в области цифровых двойников управления металлообработкой, предлагается использовать цифровые двойники для формирования новых программ ЧПУ, которые позволят обрабатывать детали без предварительных настроек и экспериментов [10]. То есть вопросы выбора технологических режимов обработки как в процессе решения текущих задач, так и при перестройке системы управления на металлорежущем станке (свойство гибкости) могут быть решены с использованием виртуальных моделей цифрового двойника. В современном представлении технология построения цифровых двойников с точки зрения синтеза виртуальных моделей базируется на двух парадигмах, первая из которых основана на использовании детерминированных математических моделей [10], а вторая – на широком внедрении нейронных сетей [8, 9].

Одним из важнейших направлений развития технологии цифрового двойника является направление диагностики различных неисправностей. К примеру, в работе [11] рассматриваются вопросы генерации размеченных обучающих наборов данных для различных неисправностей подшипников, которые дополняли бы ограниченные измеренные данные. Здесь авторы предлагают новый подход с использованием цифрового двойника для решения проблемы ограниченных измеренных данных при диагностике неисправностей подшипников. Результаты экспериментов, проведенных авторами, показывают повышение точности диагностики неисправностей [12]. Это же направление, но несколько в ином представлении, раскрывается в работе [13]. Здесь авторы указывают на ограниченность традиционных методов диагностики неисправностей на основе экспериментальных данных. Они отмечают, что в некоторых критически важных промышленных сценариях такой набор данных не всегда доступен. Именно технология цифрового двойника, которая создает виртуальное представление физического объекта, отражающее его рабочие условия, позволяет диагностировать неисправности технических систем или технологических процессов, когда данных о неисправностях недостаточно. Авторы предлагают систему диагностики неисправностей на основе цифровых двойников с использованием размеченных смоделированных данных и неразмеченных измеренных данных [13]. Построение системы цифрового двойника, осуществляющей в режиме реального времени интеграцию данных датчиков с неисправных подшипников в подпространства виртуальных моделей, представлено в работе [14]. Авторы уточняют параметры виртуальных моделей путем сравнения результатов цифрового моделирования во временной области с измеренными и снятыми сигналами [14].

Вместе с тем комплексное влияние изношенности режущего инструмента на динамику процесса резания – крайне сложная задача современности, решение которой невозможно без учета термодинамических особенностей процессов, протекающих при резании металлов [15, 16]. В результате анализа видно, что технология цифрового двойника получила широкое распространение в диагностике неисправностей, в том числе неисправностей подшипников. Поэтому очевидным развитием технологии цифрового двойника является применение ее для прогнозирования влияния изнашиваемости режущего

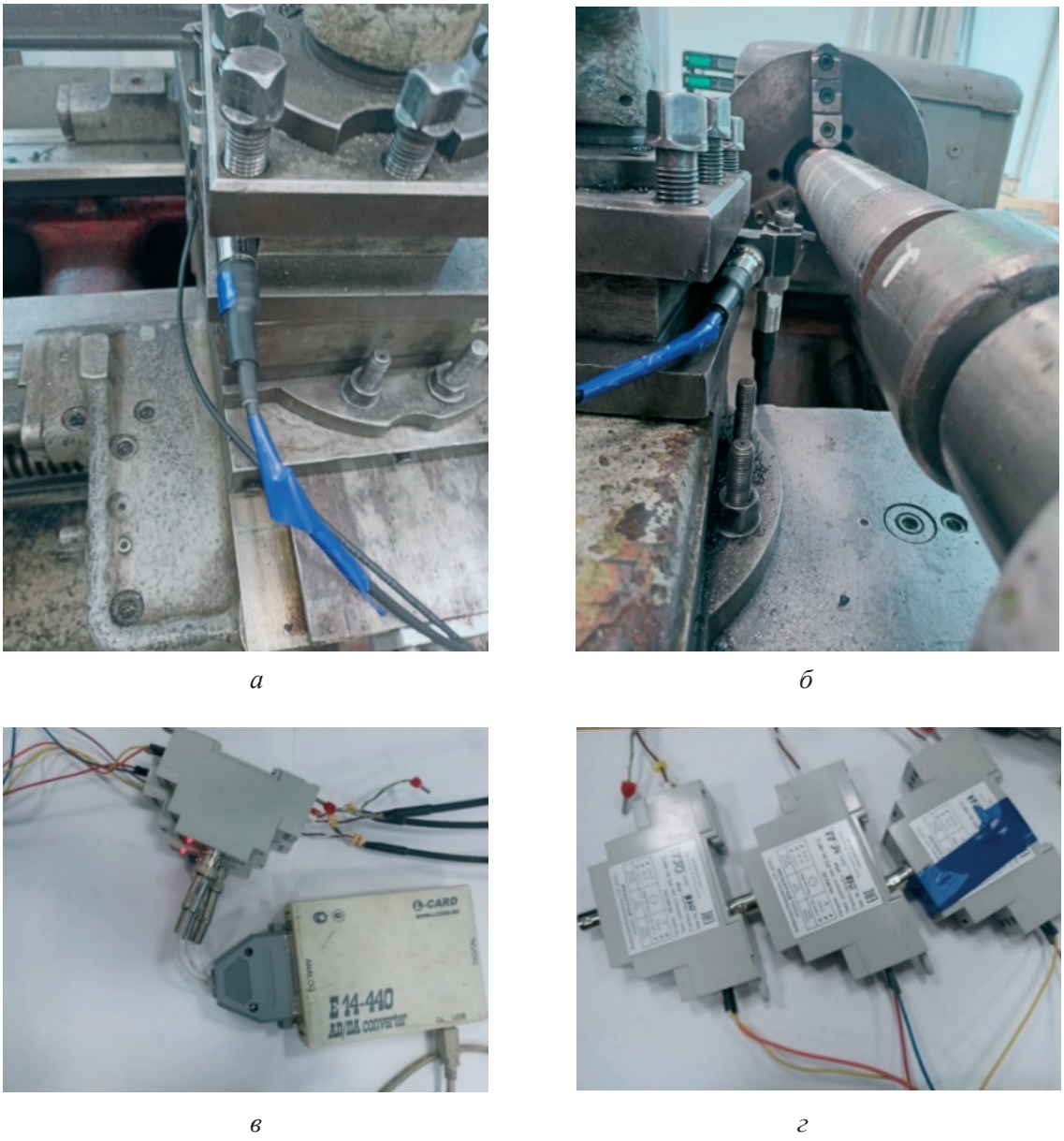
инструмента на качество получаемых при резании деталей.

Исходя из этого, сформулируем ***цель исследования*** как повышение точности прогнозирования системой цифрового двойника качества получаемой при резании поверхности обрабатываемых деталей в условиях роста износа режущего инструмента за счет параметрической идентификации виртуальных моделей цифрового двойника по данным, получаемым системой вибрационного мониторинга процесса резания.

Методика исследований

Система вибромониторинга с оценкой изношенности режущего инструмента, а также качества получаемых при резании поверхностей

В основе экспериментальной составляющей исследований лежит широкое использование вибродиагностической подсистемы, которая была размещена на самом режущем инструменте, вернее на его державке (рис. 1). В основе этой



а *б*

в *г*

Рис. 1. Система вибромониторинга на станке 1К625:
а, *б* – промышленные акселерометры; *в*, *г* – усилитель-преобразователь и АЦП

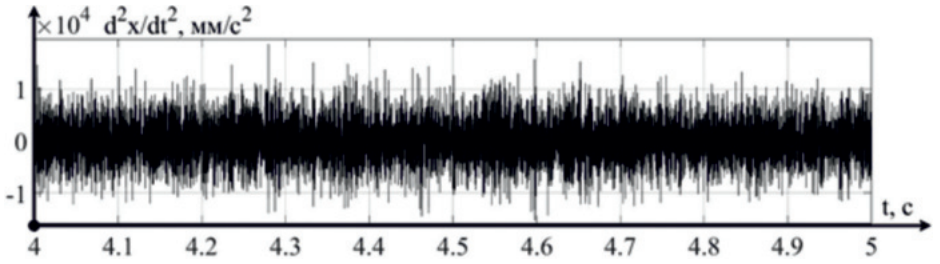
Fig. 1. Vibration monitoring system on the *1K625* lathe:
а, *б* – industrial accelerometers; *в*, *г* – amplifier converter and *ADC*

системы выступает промышленный акселерометр общего назначения стандарта IEPE (ICP) со встроенным усилителем-преобразователем заряда A603C01T (частотный диапазон (±3 дБ): 0,4…15 000 Гц; чувствительность (±10 %): 100 мВ/*g*, или 10,2 мВ/(м/с^2)) и преобразователь ICP (IEPE) одноканальный с частотным диапазоном 0,1…50 000 Гц.

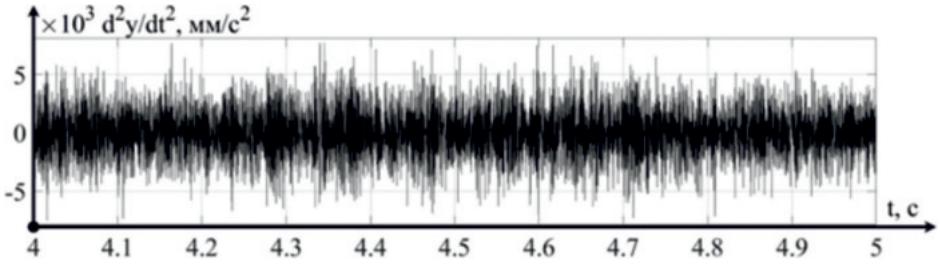
Как видно из рис. 1, основа системы вибромониторинга – это пьезоэлектрические датчики вибраций режущего инструмента. Отметим, что сейчас получили широкое развитие новые интеллектуальные датчики, которые уже обладают возможностью цифрового отображения виброускорений, скоростей и перемещений инструмента [17–20].

Рассмотрим работу этой системы на одном примере точения, в котором обработке подвергался стальной вал (сталь 45) диаметром 50 см. Резание проходило на станке 1K625, режим обработки – со скоростью 124 м/мин, глубиной 1 мм и скоростью подачи 0,11 мм на оборот (рис. 2–4). Результаты измерения виброускорений последовательно интегрировали дважды в программе, написанной в среде Matlab.

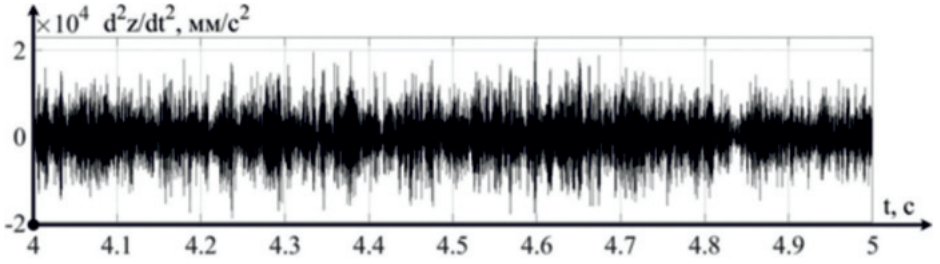
Таким образом, все измеренные по каналам *x*, *y*, *z* сигналы виброускорений, а также расчетные значения виброскоростей и виброперемеще-



а



б



в

Рис. 2. Сигналы вибрационного ускорения для случая резания на скорости 150 м/мин:

а – в осевом направлении; *б* – в радиальном направлении; *в* – в тангенциальном направлении

Fig. 2. Vibration acceleration signals for cutting at a speed of 150 m/min:

а – in the axial direction; *б* – in the radial direction; *в* – in the tangential direction

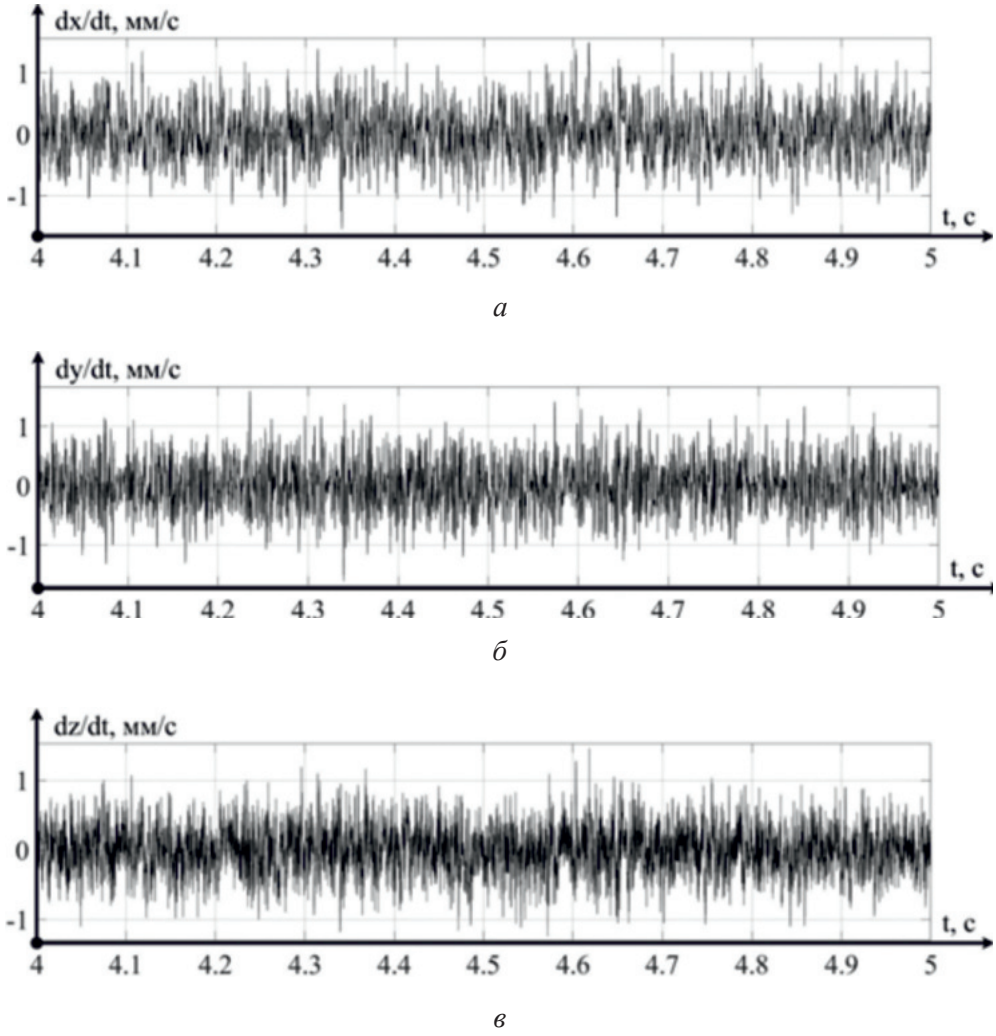


Рис. 3. Сигналы вибрационной скорости для случая резания на скорости 150 м/мин:

а – в осевом направлении; *б* – в радиальном направлении; *в* – в тангенциальном направлении

Fig. 3. Vibration velocity signals for cutting at a speed of 150 m/min:

а – in the axial direction; *б* – in the radial direction; *в* – in the tangential direction

ний приведены для одного случая измерений на указанных выше рисунках.

Проверку адекватности работы программы поэтапного интегрирования снятого сигнала виброускорения удобно рассматривать на примере анализа основных несущих частот в спектре снимаемого сигнала, как это сделано на рис. 5.

Как видно из рис. 5, основные несущие частоты остаются на своих местах, однако высокочастотная составляющая вибросигнала существенно ослабляется. Это связано с тем фактом, что при интегрировании использовали операцию суммирования и усреднения, которая совпадает с инерционными свойствами объекта (инструмента).

Реальный износ режущего инструмента может быть обусловлен влиянием случайных факторов, учесть которые в математических моделях цифрового двойника не представляется возможным. Для оценки реального износа режущего инструмента был проведен отдельный эксперимент на станке 1К625, где с указанными ранее параметрами резания производилась обработка вала из стали 45. Для измерения изношенности режущего клина на каждом шаге (всего 8 шагов) оценивался реальный износ режущего клина на задней грани с использованием микроскопа металлографического инвертированного «ЛабоМет-И», вариант 4, с широкоугольными объективами 5/20 с линейным полем зрения

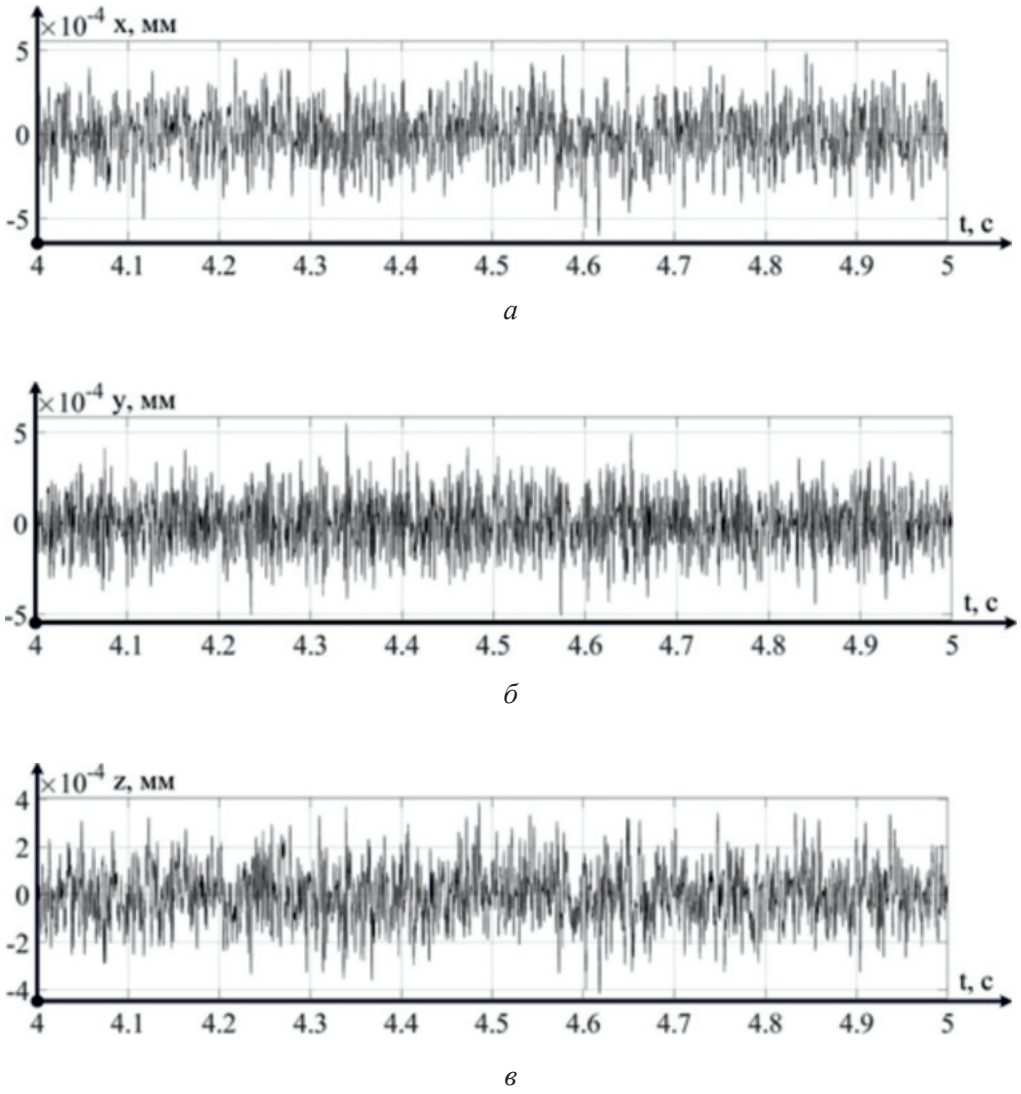


Рис. 4. Сигналы вибрационного перемещения для случая резания на скорости 150 м/мин:

а – в осевом направлении; *б* – в радиальном направлении; *в* – в тангенциальном направлении

Fig. 4. Vibration displacement signals for cutting at a speed of 150 m/min:

а – in the axial direction; *б* – in the radial direction; *в* – in the tangential direction

20 мм и с цифровой камерой для микроскопов Ucam-1400 с матрицей размером 1,4×1,4 мкм. Сам микроскоп и результаты измерений по нему приведены на рис. 6.

Часть результатов измерений величины износа режущего инструмента приведены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, износ по задней грани составил для первого варианта 0,3 мм, а для второго варианта 0,33 мм. Результаты всех измерений удобно представить в виде табл. 1.

Результаты измерений, приведены на рис. 8.

В представленном на рис. 9 варианте развития кривой изношенности режущего инструмента определили три точки измерения характеристик, которые использовали в последующем для идентификации виртуальных моделей цифрового двойника.

Рассмотрим вопрос изменения качества получаемой при резании поверхности при нарастании степени изношенности режущего инструмента. Для проведения такой оценки применялся оптический трехмерный микроскоп Contour ELITE и контурограф-профилограф T4HD, которые представлены на рис. 9.

Контроль качества обработанной поверхности, учитывая размеры измерительного оборудования (оптический трехмерный микроскоп Contour ELITE, контурограф-профилограф T4HD),

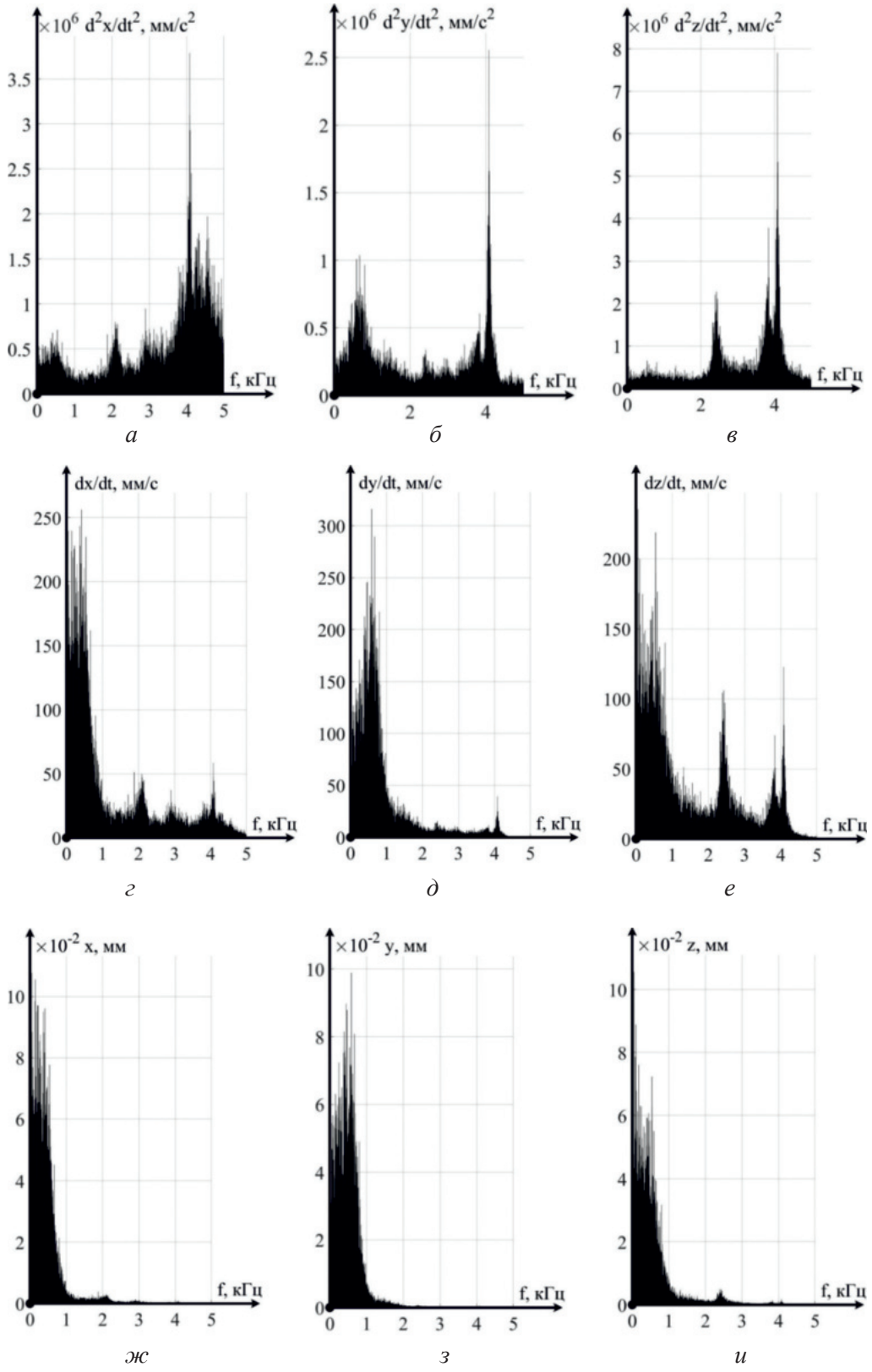


Рис. 5. Спектры мощности сигналов вибрационной активности режущего инструмента для случая резания со скоростью 150 м/мин:

а, *б*, *в* – в осевом направлении; *г*, *д*, *е* – в радиальном направлении; *ж*, *з*, *и* – в тангенциальном направлении

Fig. 5. Power spectra of cutting tool vibration activity signals for cutting at a speed of 150 m/min:

а, *б*, *в* – in the axial direction; *г*, *д*, *е* – in the radial direction; *ж*, *з*, *и* – in the tangential direction

Рис. 6. Внешний вид микроскопа

Fig. 6. The appearance of the microscope

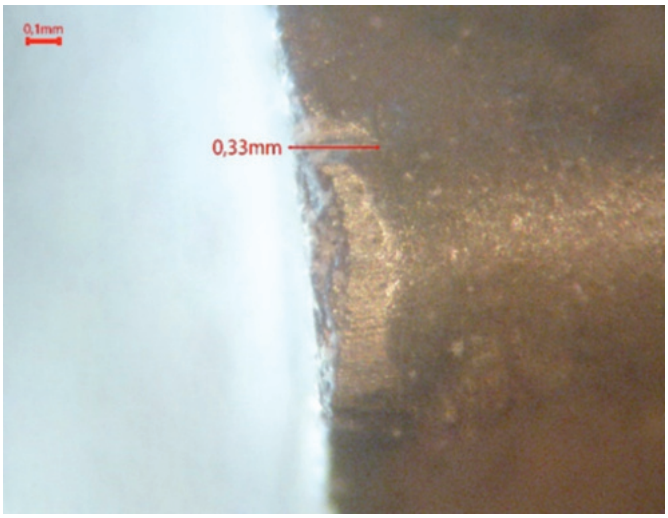


Рис. 7. Фотография с измеренным значением изношенности

Fig. 7. Photograph with measured wear value

Таблица 1

Table 1

Данные износа инструмента в процессе обработки

Data on tool wear during processing

Пройденный резцом путь, м	0	202	552	840	1375	2010	3061
Износ режущей пластины, мм	0,01	0,11	0,20	0,23	0,24	0,26	0,36

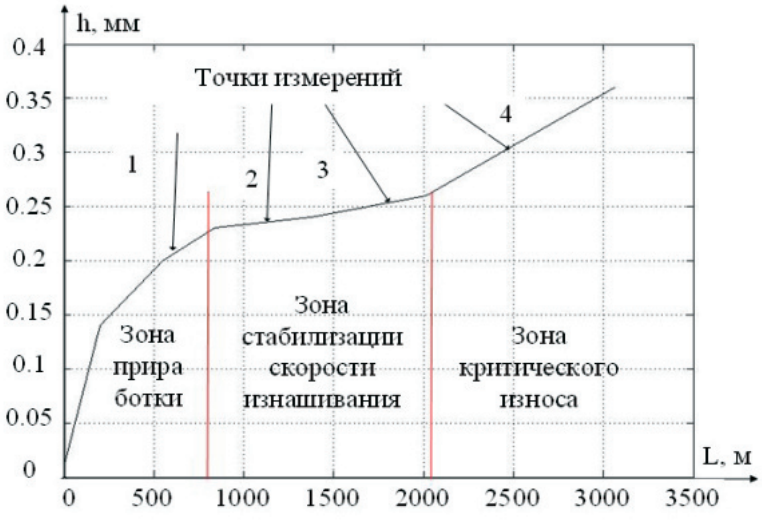
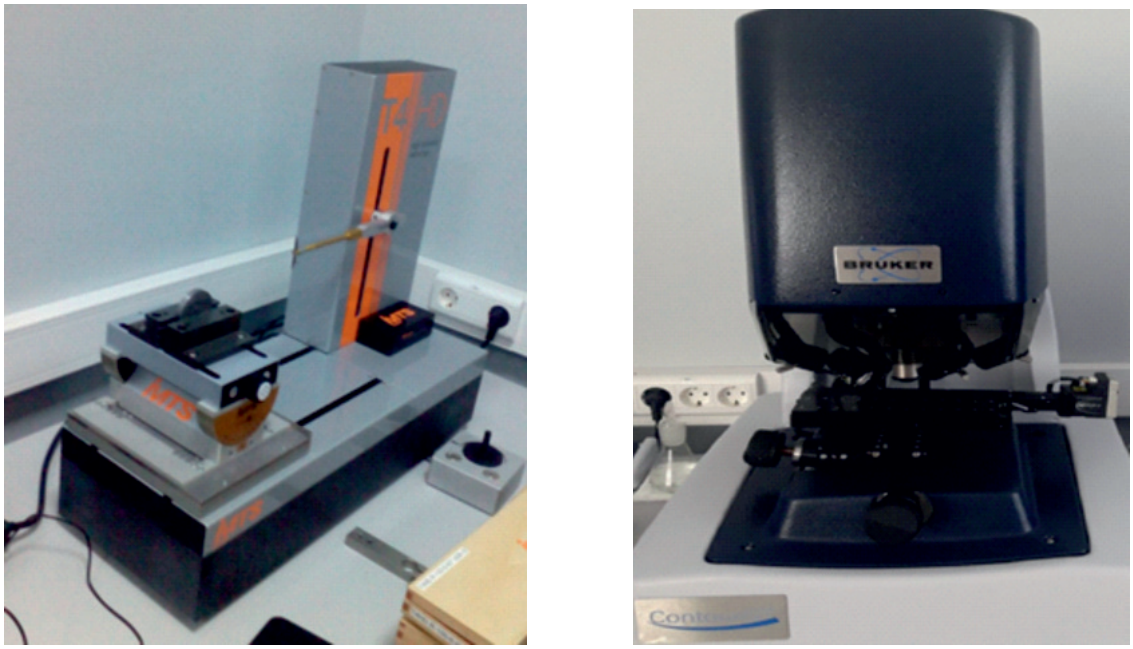


Рис. 8. Измеренная кривая износа режущего инструмента

Fig. 8. Measured wear curve of the cutting tool



а *б*

Рис. 9. Измерительное оборудование:
а – контурограф-профилограф T4HD; *б* – микроскоп Contour ELITE
Fig. 9. Measuring device:
а – contour profile recorder *T4HD*; *б* – microscope *Contour ELITE*

на самом станке и обрабатываемой детали проводить нельзя. С целью оценки качества потребовалось уменьшить оцениваемую обработанную поверхность, для чего каждый шаг эксперимента, на котором был измерен уровень износа инструмента, должен был иметь свою оцениваемую обработанную поверхность. Учитывая, что в эксперименте обтачивался вал, удобно после каждого прохода инструмента вдоль вала измерять износ инструмента, а следующий этап осуществлять таким образом, чтобы оставалась часть обработанной поверхности, полученной на предыдущем этапе.

После серии такого рода экспериментов, в которых также измерялась силовая реакция и мощность необратимых преобразований (температура в зоне резания), обработанный вал представлял собой конус с дискретно уменьшающимся радиусом (рис. 10).

После обработки на токарном станке этот вал можно разрезать на небольшие части (рис. 11), каждая из которых характеризует качество обработки для оцененного уровня износа инструмента.

Полученные части вала уже позволили получить оценку качества обработки поверхности точением с различной степенью износа инструмента как на контурографе-профилографе T4HD, так и на оптическом трехмерном микроскопе Contour ELITE.

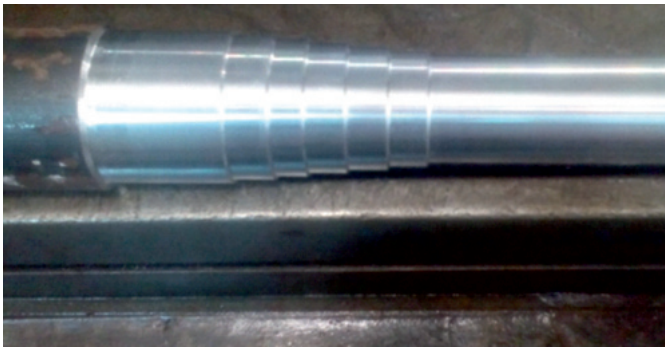


Рис. 10. Деталь после окончания эксперимента
Fig. 10. Part after the experiment is complete

Рис. 11. Подготовленная к измерениям деталь
Fig. 11. The part prepared for measurements

Результаты оценки данных, полученных с помощью оптического микроскопа Contour ELITE, – изменение параметров *Ra* и *Rz* (мкм) по шагам эксперимента, представлены в табл. 2.

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, единой и стройной картины изменения параметров *Ra* и *Rz* не наблюдается. Можно заметить значительный рост среднего арифметического отклонения профиля от средней линии вдоль оси *y* с некоторыми колебаниями на пятом шаге, но изменения *Ra* и *Rz* по оси *x* незначительны, более того – в целом оба показателя вдоль этой оси даже уменьшаются.

В представленном на рис. 12 случае, полученном во второй точке измерений, хорошо видно, что изменения профиля детали вдоль линии подачи (ось *y*) обусловлены именно величиной шага перемещения инструмента вдоль линии подачи. При этом если скорость подачи уменьшить, то и параметры *Ra* и *Rz* по оси *y* упадут, а если увеличить, то они вырастут. Для наглядности проиллюстрируем обработанную поверхность, полученную с помощью микроскопа Contour ELITE, во второй точке эксперимента в виде 3D-модели (рис. 13).

Для иллюстрации вида поверхности при износе, близком к катастрофическому, рассмотрим фотографию обработанной поверхности, полученной с помощью микроскопа Contour ELITE, в четвертой точка эксперимента (рис. 14).

Как видно из рис. 14, качество обработанной поверхности на этом шаге эксперимента существенно ухудшилось, что также видно из показателя *Ra* по оси *y*, который для этого случая максимален (см. табл. 2). Среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии вдоль оси *y* не самое большое, что объясняется особенностью расположения оси измерения, которая просто не попадает на участок с наибольшими перепадами микропрофиля детали. Для наглядности проиллюстрируем последний случай 3D-моделью изображения поверхности (рис. 15).

Таблица 2

Table 2

Результаты измерения показателей шероховатости Contour ELITE

Results of measuring Contour ELITE roughness indicators

Параметр	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
Rz по оси *y* (мкм)	26,186	21,347	22,898	18,152
Ra по оси *y* (мкм)	2,41	1,493	1,794	2,975

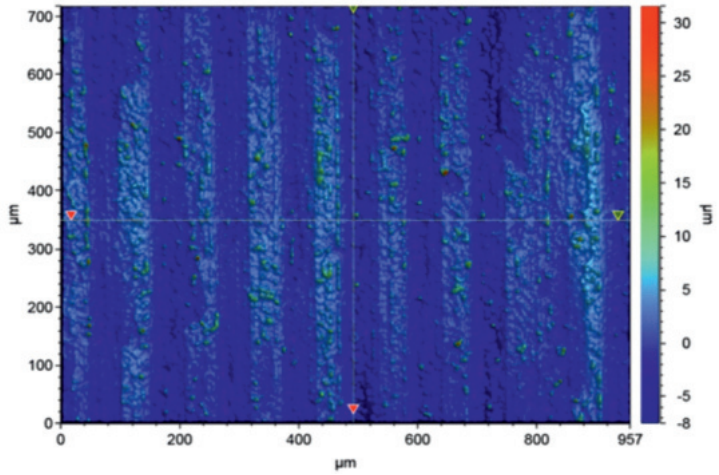


Рис. 12. Фотография обработанной поверхности, полученная с помощью микроскопа Contour ELITE, после первого шага эксперимента

Fig. 12. Photograph of the machined surface, obtained with a microscope *Contour ELITE*, after the first step of the experiment

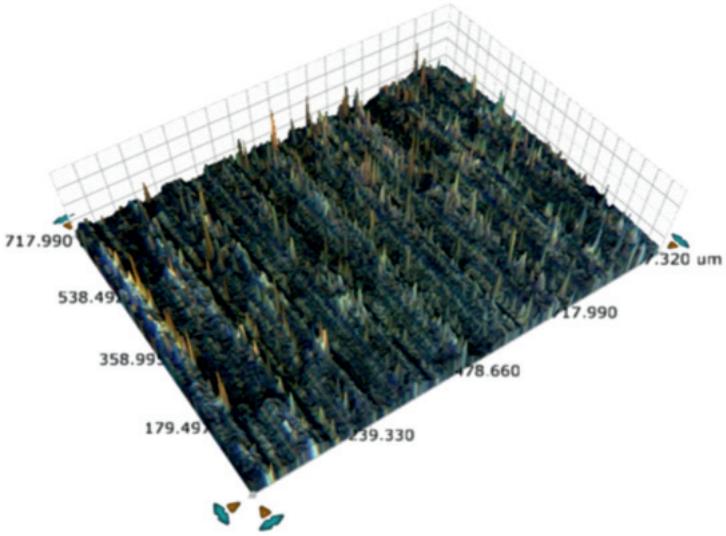


Рис. 13. 3D-модель поверхности после первого шага эксперимента

Fig. 13. 3D model of the surface after the first step of the experiment

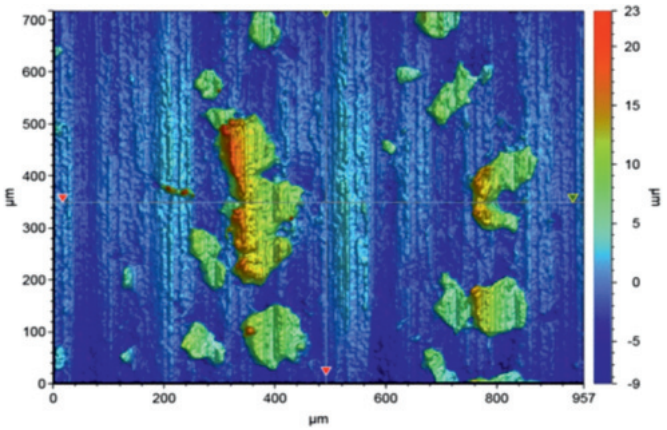


Рис. 14. Фотография обработанной поверхности, полученная с помощью микроскопа Contour ELITE, после шестого шага эксперимента

Fig. 14. Photograph of the machined surface, obtained with a microscope *Contour ELITE*, after the sixth step of the experiment

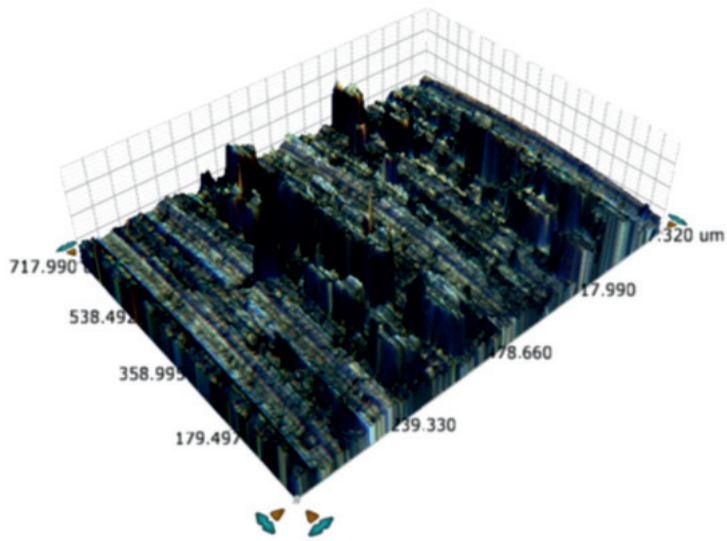


Рис. 15. 3D-модель поверхности после шестого шага эксперимента

Fig. 15. 3D model of the surface after the sixth step of the experiment

3D-модель, представленная на рис. 15, в сравнении со случаем на рис. 13 позволяет говорить о существенном ухудшении качества обработанной поверхности. График, обобщающий проведенные эксперименты, приведен на рис. 16.

Как видно из рис. 16, наиболее информативным параметром здесь выступает показатель *Ra*. В целом данные, полученные с помощью оптического трехмерного микроскопа Contour ELITE, носят качественный характер, особенно их

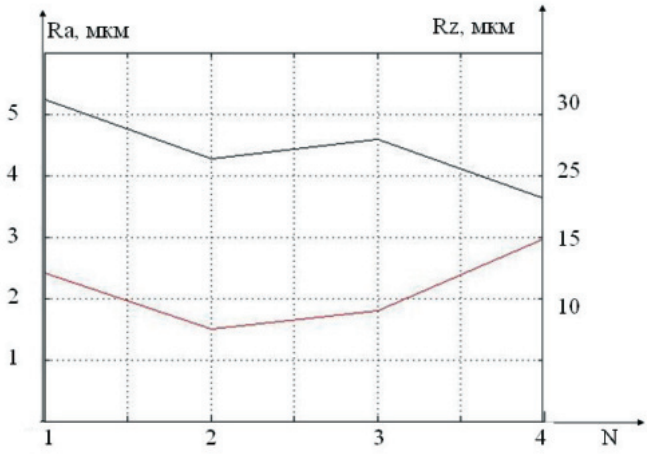


Рис. 16. Результаты измерения качества поверхности в четырех точках

Fig. 16. Results of surface quality measurement at 4 points

3D-модели, и не позволяют получить четкую количественную картину изменения шероховатости обработанной поверхности. Для получения количественной оценки качества обработанной поверхности нами был использован контурограф-профилограф T4HD, протоколы его измерений по одному шагу эксперимента представлены на рис. 17. Отметим, что оценка параметров шероховатости проводилась в направлении, ортогональном подаче, т. е. вдоль оси *y*.

Все результаты измерений показателей шероховатости удобно обобщить в виде табл. 3.

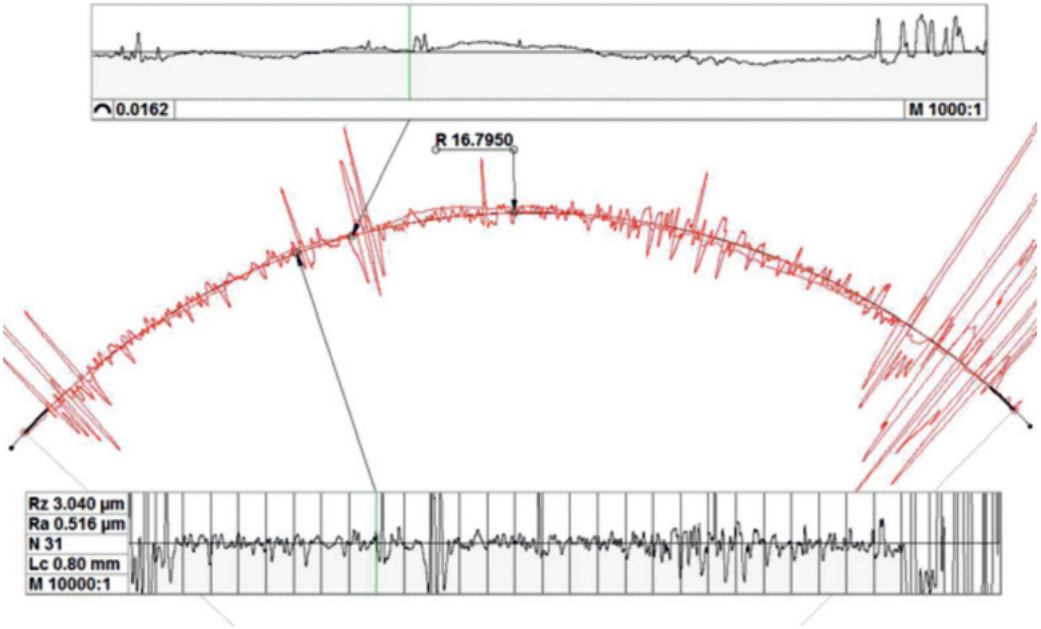


Рис. 17. Пример протокола, снятого на контурографе-профилографе T4HD

Fig. 17. Example of the protocol captured on the contour profile recorder *T4HD*

Таблица 3

Table 3

Показатели качества по протоколам T4HD

Quality indicators for T4HD protocols

Путь (м)	0	202	552	840	1375	2010	3061
Rz (мкм)	4,704	3,040	3,272	3,396	3,632	5,92	9,274
Ra (мкм)	0,609	0,516	0,527	0,532	0,602	0,969	1,69

Как видно из табл. 3, оба параметра шероховатости растут вместе с ростом износа, причем со второго шага эксперимента наблюдается некоторая стабилизация, а после шестого шага – резкий рост шероховатости. График изменения шероховатости во времени представлен на рис. 18.

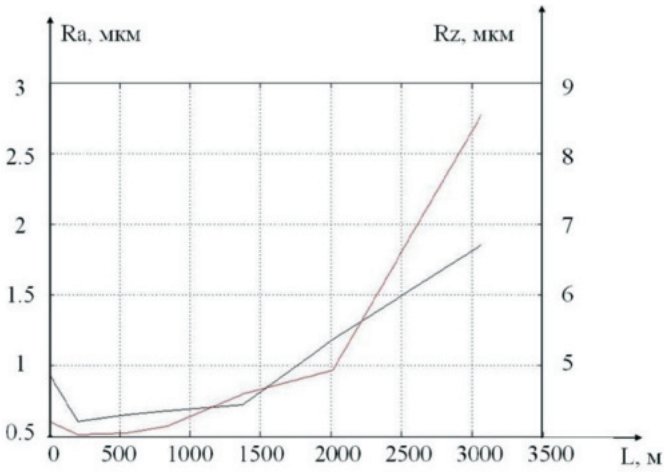


Рис. 18. Изменение показателей шероховатости по пути резания

Fig. 18. Change in roughness indicators along the cutting path

Как видно из рис. 18, при увеличении износа начинают расти показатели шероховатости, а на начальном этапе зависимость *Ra* и *Rz* от износа носит падающий характер, что связано с влиянием приработки режущего инструмента. Чем ближе к точке катастрофического износа, тем сильнее рост шероховатости, и зависимость уже нелинейная.

Виртуальные модели цифрового двойника

Синтез виртуальных моделей цифрового двойника начнем с построения кривой изнашиваемости режущего инструмента на основе использования оператора Вольтерры второго рода [20]. Здесь надо учитывать реальный путь, пройденный инструментом, в том числе из-за вибрационных перемещений вершины инструмента. Этот путь рассчитывается с учетом результатов обработки данных, получаемых системой вибромониторинга. То есть путь, пройденный инструментом, будет вычисляться как сумма расчетного пути L_0, определяемого скоростью резания и подачи, а также виртуального пути, пройденного инструментом:

$$L_v = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \qquad (1)$$

Результаты моделирования систем уравнений цифрового двойника позволяют рассчитать прогнозируемое развитие величины изношенности режущего инструмента. При моделировании необходимо учитывать тот факт, что причина эволюционных преобразований связана с мощностью и работой сил резания, т. е. с энергией необратимых преобразований в зоне обработки. Для моделирования эволюционных изменений в этом случае необходимо использовать интегральные операторы Вольтерры второго рода, имеющие следующую структуру [20]:

$$h_3 = k\int_0^A w(t-\xi)N(\xi)d\xi, \qquad (2)$$

где $w(t-\xi)$ – ядро интегрального оператора; $N(\xi)$ – фазовая траектория мощности необратимых преобразований по совершенной работе; A – работа сил резания.

Однако, как это следует из структуры оператора, износ зависит от текучести необратимых преобразований и ее предыстории, которая учитывается ядром интегрального оператора. Естественно положить ядро интегрального оператора в следующем виде:

$$h_3 = \int_0^A \left(\beta_1 e^{\alpha_1(\xi-A)} + \beta_2 e^{\alpha_2(A-\xi)}\right) N(\xi)d\xi, \qquad (3)$$

где $\left(\beta_1 e^{\alpha_1(\xi-A)} + \beta_2 e^{\alpha_2(A-\xi)}\right)$ – сумма ядер интегрального оператора, при этом $\beta_1 e^{\alpha_1(\xi-A)}$ – ядро, определяющее процессы приработки инструмента, а $\beta_2 e^{\alpha_2(A-\xi)}$ – ядро, определяющее процессы износа; β_1, β_2, α_1, α_2 – параметры, подлежащие идентификации; N – мощность необратимых преобразований; A – работа.

Мощность необратимых преобразований определим как $N = R\sqrt{V_{\text{под}}{}^2 + V^2}$, где R – сила резания. Работу определим в виде следующего интеграла: $A = \int_0^t N(t)dt$.

Для случая, когда $N = N_0 = \text{const}$, формулу (2) удобно представить в виде

$$h_3 = N_0\int_0^A \left(e^{\alpha_1(\xi-A)} + e^{\alpha_2(A-\xi)}\right)d\xi. \qquad (4)$$

Решение для уравнения (4) будет следующим:

$$h_3 = N_0 \frac{1}{\alpha_1}\left(1 - e^{-\alpha_1 A}\right) + N_0 \frac{1}{\alpha_2}\left(e^{\alpha_2 A} - 1\right). \quad (5)$$

Если $N(t)$ не равно $N_0 = \text{const}$, и приняв допущение, что $N_0, N_1, \ldots, N_{n-1}$ ввиду малости величины $\Delta A = A_k - A_{k-1}$ – величины, близкие к постоянным, то получим следующую приближенную сумму, описывающую интегральный оператор (5):

$$h_3 = \frac{\beta_1}{\alpha_1}\Big[-N_0 e^{-\alpha_1 A} - (N_1 - N_0)e^{\alpha_1(A_1 - A)} - (N_2 - N_1)e^{\alpha_1(A_2 - A)} - \ldots - (N_{n-1} - N_{n-2})e^{\alpha_1(A_{n-1} - A)} + N_{n-1}\Big] + \frac{\beta_2}{\alpha_2}\Big[N_0 e^{\alpha_2 A} + (N_1 - N_0)e^{-\alpha_2(A - A_1)} + (N_2 - N_1)e^{-\alpha_2(A - A_2)} + \ldots + (N_{n-1} - N_{n-2})e^{-\alpha_2(A - A_{n-1})} - N_{n-1}\Big]. \quad (6)$$

Оговорим здесь, что β_1, β_2, α_1, α_2 – параметры, подлежащие идентификации, – в модели расчета износа были определены по результатам предварительных экспериментов, проведенных нами ранее. График развития изношенности режущего инструмента по задней грани по расчетным данным приведен на рис. 19.

Сравнительный анализ рис. 8 и 19 показывает, что зона критического износа на рис. 8 начинается раньше, чем на рис. 19. Такое расхождение обусловлено процессом стружкообразования: при обработке мы сознательно допустили случай резания с сильными вибрациями из-за накопления сливной стружки. В результате этих вибраций произошли изменения в контакте задней грани инструмента и обрабатываемой детали, что привело к появлению новых элементов в зоне износа.

Как видно из рис. 8 и 19, кривая развития изношенности режущего инструмента по пройденному пути делится на три области:

– область приработки, где формируется предварительный износ режущего инструмента;

– область стабилизации изношенности, когда величина износа нарастает достаточно медленно;

– область формирования критического износа, при котором величина изношенности режущего инструмента нарастает очень быстро.

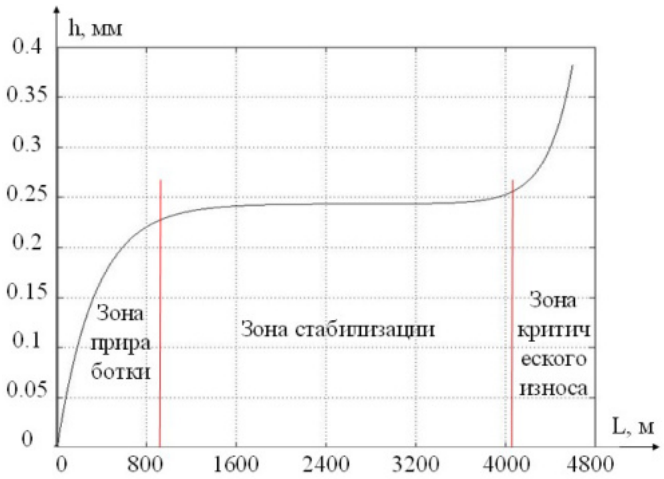


Рис. 19. Рассчитанная кривая износа режущего инструмента

Fig. 19. Calculated cutting tool wear curve

В качестве базовой виртуальной модели цифрового двойника примем систему нелинейных уравнений. Зависимость силы резания от температурно-скоростного коэффициента резания будем интерпретировать в виде убывающей экспоненциальной зависимости:

$$\rho = \rho_0\left(1 + \mu e^{-\alpha_\mu\left(V_c - \frac{dz}{dt}\right)}\right), \quad (7)$$

где ρ_0 – наименьшее значение ρ (коэффициента, зависящего от температуры и характеризующего давление стружки на переднюю грань режущего клина); μ – коэффициент, показывающий кривизну экспоненциального уменьшения ρ при росте температуры контакта; α_μ – коэффициент крутизны характеристики ρ; $V_c - dz/dt$ – реальная скорость резания.

С учетом формулы (7) сила резания может быть представлена в виде следующего выражения:

$$F = \rho_0\left(1 + \mu e^{-\alpha_1\left(V_c - \frac{dz}{dt}\right)}\right) \times (a_p - y)\int_{t-T_v}^{t}\left(V_f - \frac{dx}{dt}\right)dt, \quad (8)$$

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

Выталкивающее усилие, исходящее из зоны резания, в зависимости от износа инструмента вдоль задней поверхности и в зависимости от температурного расширения обрабатываемого материала мы рассматриваем как

$$F_h = \left(\sigma_0 + k_Q^F Q_h\right) h_3 (a_p - y) e^{-K_h x}, \qquad (9)$$

где σ_0 – предел прочности обрабатываемого металла при сжатии [кг/мм^2], зависящий от температуры контакта между задней поверхностью инструмента и обрабатываемой деталью Q_h, измеряемой в градусах Цельсия; K_h – коэффициент, характеризующий нелинейное увеличение толкающего усилия при сближении задней поверхности инструмента и обрабатываемой детали.

Через главный угол в плане φ выталкивающую силу можно разложить по осям деформации x и y следующим образом:

$$\begin{cases} F_h^{(x)} = \cos\varphi F_h; \\ F_h^{(y)} = \sin\varphi F_h. \end{cases} \qquad (10)$$

Составляющая силы на задней грани в направлении координаты z, интерпретируемая как сила трения:

$$F_h^{(z)} = k_t F_h, \qquad (11)$$

где k_t – коэффициент трения, интерпретируется как

$$k_t = k_{0t} + \Delta k_t \left[e^{-K_{f1} Q_h} + e^{K_{f2} Q_h} \right] \Big/ 2, \qquad (12)$$

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

Общее выражение, описывающее разложенную по осям деформации силовую реакцию, примет следующий вид:

$$\begin{cases} F_f = \chi_1 F + F_h^{(x)}; \\ F_p = \chi_2 F + F_h^{(y)}; \\ F_c = \chi_3 F + F_h^{(z)}, \end{cases} \qquad (13)$$

где χ_i является коэффициентом разложения силы резания на i-ю ось деформации инструмента.

Модель деформационных перемещений вершины инструмента будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2} + h_{11}\dfrac{dx}{dt} + h_{12}\dfrac{dy}{dt} + h_{13}\dfrac{dz}{dt} + \\ + c_{11}x + c_{12}y + c_{13}z = F_f; \\ m\dfrac{d^2y}{dt^2} + h_{21}\dfrac{dx}{dt} + h_{22}\dfrac{dy}{dt} + h_{23}\dfrac{dz}{dt} + \\ + c_{21}x + c_{22}y + c_{23}z = F_p; \\ m\dfrac{d^2z}{dt^2} + h_{31}\dfrac{dx}{dt} + h_{32}\dfrac{dy}{dt} + h_{33}\dfrac{dz}{dt} + \\ + c_{31}x + c_{32}y + c_{33}z = F_c, \end{cases} \qquad (14)$$

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

Дифференциальное уравнение, описывающее передачу температуры через заднюю поверхность инструмента при предыдущем вращении шпинделя в текущую зону контакта инструмента и обрабатываемой детали, имеет следующий вид:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 Q_h}{dt^2} + (T_1 + T_2)\frac{dQ_h}{dt} + Q_h = kN, \qquad (15)$$

где $T_1 = \dfrac{\lambda}{\alpha_1 V_c}$, $T_2 = \dfrac{h_3}{\alpha_2}$ – постоянные времени; $k = \dfrac{k_Q \lambda h_3}{\alpha_1 \alpha_2 V_c}$ – коэффициент передачи; α_1, α_2 – идентифицируемые безразмерные параметры масштабирования интегрального оператора; λ – коэффициент температуропроводности; k_Q – коэффициент, характеризующий преобразование мощности необратимых преобразований в температуру; $N = F_c(t - T_v)\left(V_c - \dfrac{dz(t - T_v)}{dt}\right) =$

$\left(\chi_3 F(t - T_v) + F_h^{(z)}(t - T_v)\right)\left(V - \dfrac{dz(t - T_v)}{dt}\right)$ – мощность необратимых преобразований.

Таким образом, система уравнений (3–15) и будет виртуальной математической моделью цифрового двойника процесса обработки металлов на металлорежущем станке.

Результаты и их обсуждение

Наиболее перспективным направлением с точки зрения параметрической идентификации

виртуальных моделей цифрового двойника является использование данных, полученных системой вибромониторинга [20]. Здесь из всей совокупности данных мы предлагаем опираться на так называемые эллипсы рассеивания, которые можно получить непосредственно из снятого сигнала виброускорения.

Рассмотрим эллипсы рассеивания для случаев, представленных на рис. 8, идентифицировав по этим данным параметры модели цифрового двойника. Результаты сопоставления этих двух вариантов расчета эллипсов рассеивания для одинаковых значений изношенности режущего клина приведены на рис. 20.

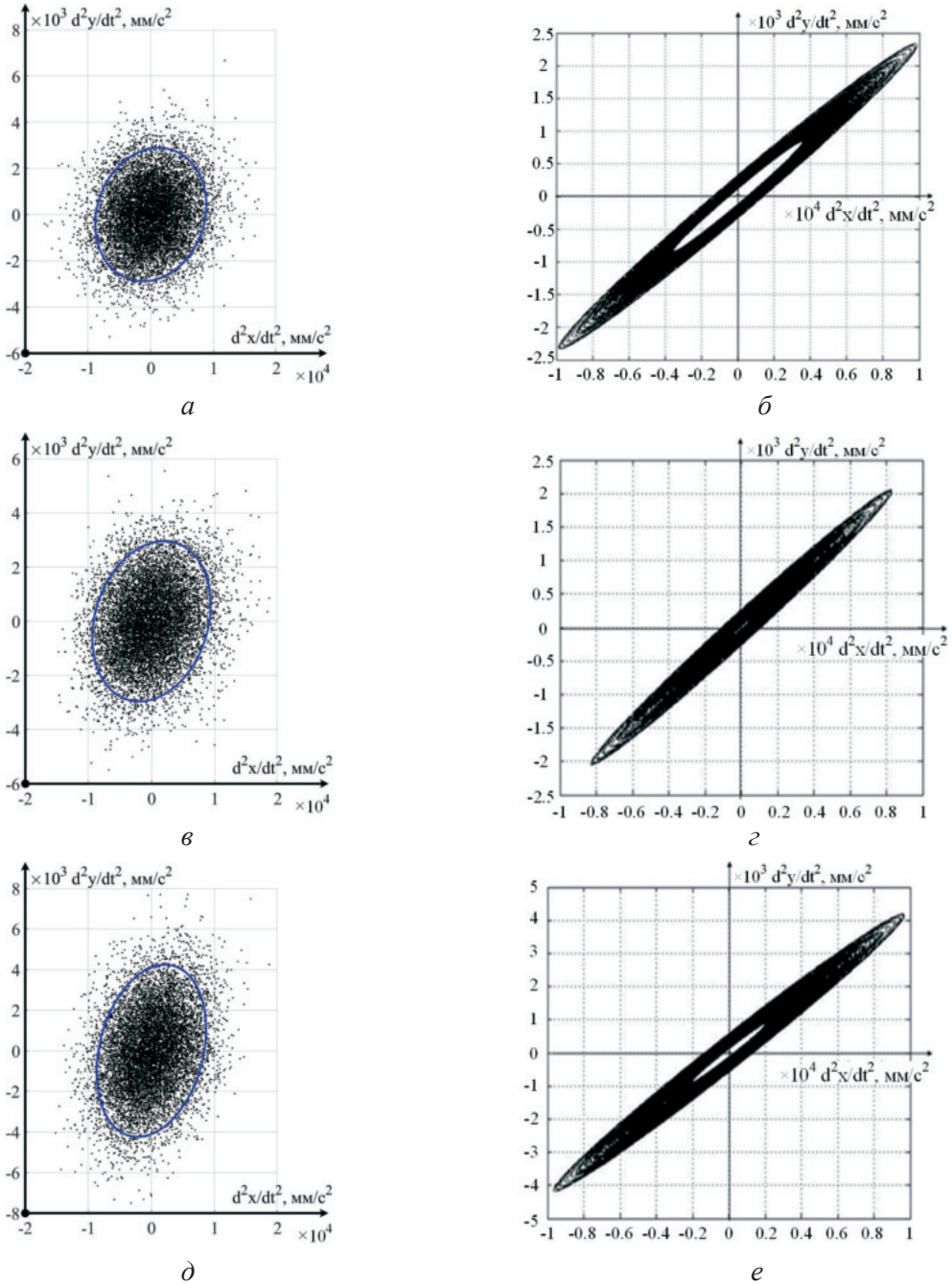


Рис. 20. Эллипсы рассеивания «розы» вибраций:

а, *б* – в плоскости *X*/*Y* с величиной изношенности *h* = 0,24 мм; *в*, *г* – в плоскости *X*/*Y* с величиной изношенности *h* = 0,27 мм; *д*, *е* – в плоскости *X*/*Y* и величиной изношенности *h* = 0,32 мм

Fig. 20. Ellipses of dispersion of the “rose” of vibrations:

а, *б* – in the *X*/*Y* plane with a wear value of *h* = 0.24 mm; *в*, *г* – in the *X*/*Y* plane with a wear value of *h* = 0.27 mm; *д*, *е* – in the *X*/*Y* plane and a wear and tear *h* = 0.32 mm

Как видно из рис. 20, размах осей эллипсов рассеивания совпадает почти точно, но рассеивание вибраций для реального станка существенно выше. Это объясняется тем, что на реальном станке присутствует вибрационная активность не только от процесса резания, но и от других несущих систем. Задача моделирования всех несущих систем вместе с системой резания пока нами не решалась.

Для оценки качества получаемой при резании поверхности анализу подвергалась только координата вибрационной активности режущего инструмента в направлении оси *y*. Такой выбор связан с тем, что вибрации вершины режущего инструмента в направлении осей *z* и *x* будут срезаться при продольной токарной обработке, которая взята за основу при моделировании системы резания. Однако при других вариантах обработки металлов резанием можно подвергать анализу и вибрационный сигнал в других направлениях. Для анализа качества получаемой при резании поверхности нам потребовалось обработать данные таким образом, чтобы из них была удалена постоянная составляющая и учитывались лишь вибрации в некотором заданном временном диапазоне. Для этого нами была составлена программа, позволяющая анализировать качество получаемой при резании поверхности как в системе цифрового двойника, так и по данным, снимаемым системой вибромониторинга. В результате получился достаточно мощный вычислительный инструмент, который в последующем можно будет использовать для параметрической идентификации виртуальных моделей цифрового двойника на реальных металлообрабатывающих станках.

Результаты моделирования деформационного движения в направлении оси *y*, а также точки, по которым оценивалась шероховатость поверхности по показателю *Ra*, приведены на рис. 21–23. На рис. 21 показан вариант расчета качества обработки по показателю *Ra* для случая резания с износом режущего инструмента по задней грани в 0,11 мм.

Как видно из рис. 21, расчет проводился по данным, полученным из модели, но не с первой секунды, т. е. не с начала моделирования, а с того времени, когда процесс резания устанавливается. В полученный выборке мы брали в расчет только минимальные и максимальные значения и использовали их для расчета показателя шероховатости, который для рассматриваемого случая будет равен 1,26 мкм.

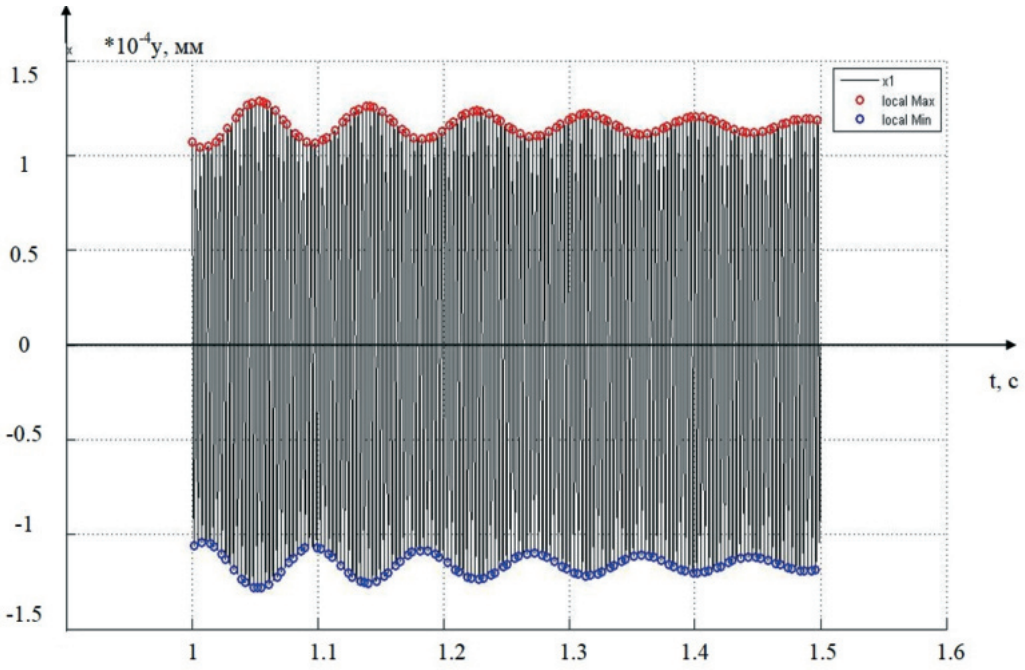


Рис. 21. Пример расчета показателя качества для случая резания с износом в 0,11 мм

Fig. 21. Example of calculating the quality index for the case of cutting with a wear of 0.11 mm

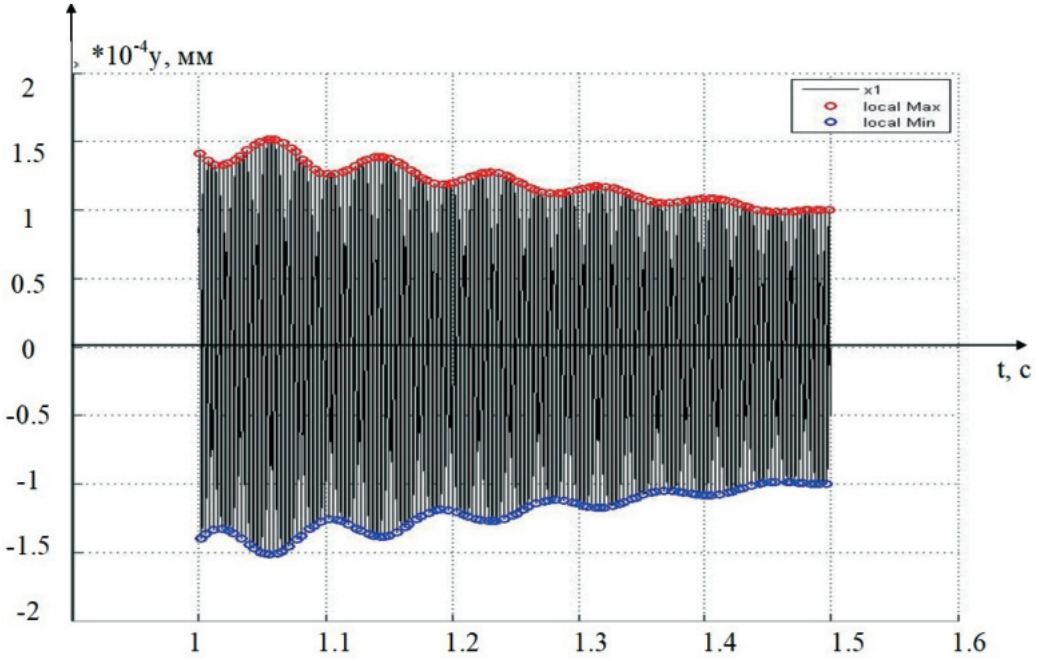


Рис. 22. Пример расчета показателя качества для случая резания с износом в 0,29 мм

Fig. 22. Example of calculating the quality index for the case of cutting with a wear of 0.29 mm

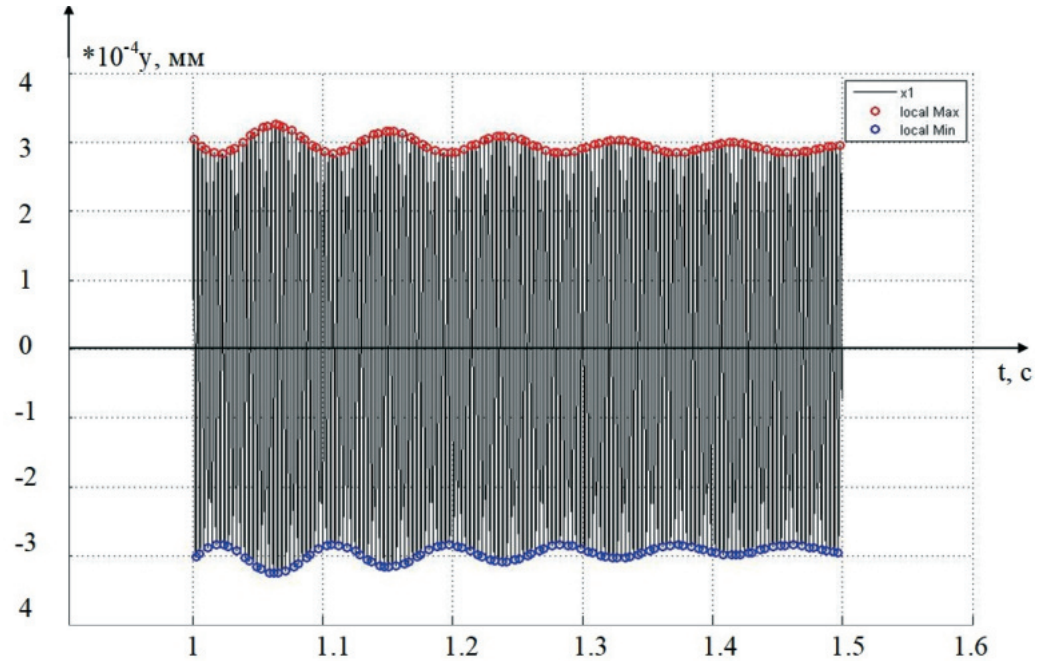


Рис. 23. Пример расчета показателя качества при h = 0,314 мм

Fig. 23. Example of calculating the quality index at h = 0.314 mm

Результаты моделирования координаты, отражающей деформационные движения вершины режущего инструмента в радиальном направлении с изношенностью режущего инструмента по задней грани в 0,29 мм, приведены на рис. 22.

Как видно из рис. 22, амплитуда деформационных движений уже значительно возрастает, и для рассматриваемого случая резания расчетное значение *Ra* достигает величины в 2,2 мкм, что существенно превышает предыдущие расчетные значения. Этот скачок обусловлен переходом

кривой изношенности из области стабилизации в область критического износа.

Рассмотрим еще один вариант резания, который характеризуется изношенностью режущего инструмента по задней грани на величину в 0,344 мм. Результаты моделирования координаты *y* для этого случая приведены на рис. 23.

Сравнение рис. 22 и 23 показывает еще более увеличившуюся амплитуду вибраций режущего инструмента, в том числе и в радиальном направлении. Величина расчетного показателя качества для рассматриваемого случая составила 4,17 мкм – это очень большое значение для токарной обработки металлов резанием, и оно может рассматриваться только как вариант предчистовой обработки.

Всего нами было проведено девять экспериментов для построения кривой изменения качества получаемой при резании поверхности. Для наглядности рассмотрим оба варианта изменения качества, а также вариант экспериментальной оценки и вариант модельной оценки. Для этого изучим изменение показателя *Ra* для случая экспериментальных данных, опираясь на интерпретацию этого показателя с использованием данных, представленных на рис. 8 и 19 (табл. 4).

Интерпретация данных табл. 4 в виде совместного графика двух характеристик приведен на рис. 24.

Как видно из рис. 24, в рассматриваемом случае сопоставления результатов моделирования

Таблица 4
Table 4

Значения показателя качества *Ra* (экспериментальные и модельные)
Values of the quality indicator *Ra* (experimental and modeled)

Износ (мм)	0,11	0,16	0,22	0,23	0,26	0,29	0,314	0,344	0,402
Ra (мкм) (модельный)	1,26	1,22	0,96	0,84	0,98	2,2	2,9	4,17	41
Ra (мкм) (экспериментальный)	0,516	0,52	0,53	0,532	0,602	0,97	1,45	1,6	39

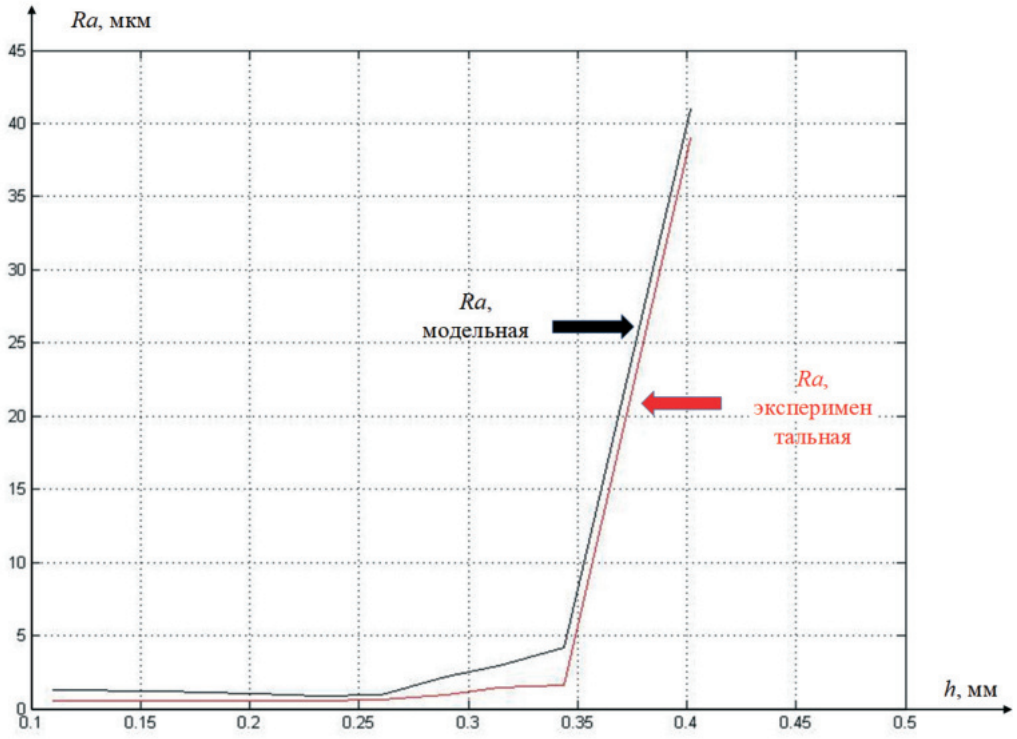


Рис. 24. Зависимость качества получаемой при резании поверхности от изношенности режущего инструмента
Fig. 24. Dependence of the surface quality obtained during cutting on the cutting tool wear

и результатов, полученных экспериментальным путем, обе характеристики обладают очень высокой степенью близости. Есть небольшое расхождение в области средних значений величины, характеризующей изношенность режущего инструмента по задней грани, но в целом характеристики почти идентичны.

Здесь надо отметить, что и модельная, и экспериментальная характеристика показывает стабилизацию и даже некоторое снижение показателя *Ra* в зоне стабилизации кривой изнашиваемости режущего инструмента (см. рис. 24).

Технология цифрового двойника опирается на широкое использование виртуальных математических моделей, численное моделирование которых может предсказывать развитие тех или иных процессов в технических системах. Важность такого прогноза во многом зависит от точности используемых при моделировании моделей, которые, в свою очередь, требуют постоянной параметрической подстройки параметров. Прежде всего такая подстройка связана с нарастающим износом режущего инструмента, который тоже должен моделироваться в системе цифрового двойника. Рассмотренный же нами частный случай резания позволяет сделать вывод только о возможности прогнозирования качества получаемой при резании поверхности по расчетам, проводимым на виртуальных моделях цифрового двойника.

В целом поставленная в начале статьи цель исследования была достигнута в основном за счет введения в модель блока расчета нарастания изношенности режущего инструмента, а также за счет параметрической идентификации остальных параметров модели. Исследования показали, что точность прогнозирования зависимости качества получаемой при резании поверхности от изношенности режущего инструмента для рассматриваемого частного случая достаточно высока. Наибольшие расхождения между моделируемой и экспериментальной характеристикой наблюдаются в области от 0,25 до 0,36 мм износа режущего инструмента. Эта область характеризуется наибольшим отклонением экспериментальной и моделируемой кривых нарастания изношенности режущего инструмента (см. рис. 8 и 19). В приведенном нами примере кривая изношенности режущего инструмента по пути резания вела себя классически, и на ней можно было отметить три участка износа, так же как на моделируемой характеристике. Однако это частный случай, и износ режущего инструмента может нарастать резко, скачком, в силу различных случайных факторов. Поэтому необходимо встраивать в систему идентификации параметров виртуальных моделей цифровых двойников интеллектуальную подсистему распознавания подобных нестандартных случаев развития износа режущего инструмента.

Заключение

В работе рассматривались вопросы оценки взаимосвязанности изнашиваемости режущего инструмента и качества получаемых при резании поверхностей. Качество получаемых при резании поверхностей оценивалось по показателю *Ra*, который оказался наиболее информативным для рассматриваемого случая – как для обработки экспериментальных данных, так и для моделирования. Учитывая зависимости, представленные на рис. 24, можно утверждать, что прогнозирование качества получаемой при резании поверхности деталей по результатам моделирования систем уравнений – вполне достижимая задача. Результаты исследований показали, что повышение качества прогнозирования получаемой при резании металлов поверхности напрямую зависит от точности моделирования кривой нарастания изнашиваемости режущего инструмента.

Некоторое расхождение результатов в целом допустимо и в части реализации системы цифрового двойника, а в части последующего уточнения параметров моделей возможно использование интеллектуальных алгоритмов распознавания, которые можно настроить на разницу между прогнозируемым и реальным значением износа режущего инструмента.

Список литературы

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. – ISBN 5-217-02976-5.

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

3. Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов / А.К. Тугенгольд, Е.А. Лукьянов, Р.Н. Волошин, В.Ф. Бонилья // Вестник Донского государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 188–195. – DOI: 10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195.

4. *Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E.* Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 112. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.

5. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, I. Lazoglu // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

6. *Altintas Y.* Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2012. – 366 p.

7. *Altintaş Y., Budak E.* Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44 (1). – P. 357–362. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.

8. *Kabaldin Y.G., Shatagin D.A.* Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital production // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40 (4). – P. 292–296. – DOI: 10.3103/S1068798X20040115.

9. *Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р.* Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2023. – № 9 (147). – С. 39–48. – DOI: 10.30987/2223-4608-2023-39-48.

10. *Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E.* Process control synergetics for metal-cutting machines // Journal of Vibroengineering. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 177–189. – DOI: 10.21595/jve.2021.22087.

11. Digital twin-assisted intelligent fault diagnosis for bearings / S. Gong, S. Li, Y. Zhang, L. Zhou, M. Xia // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35 (10). – P. 106128. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad5f4c.

12. Digital twin-driven partial domain adaptation network for intelligent fault diagnosis of rolling bearing / Y. Zhang, J.C. Ji., Ren Z., Q. Ni, F. Gu, K. Feng, K. Yu, J. Ge, Z. Lei, Z. Liu // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 234. – P. 109186. – DOI: 10.1016/j.ress.2023.109186.

13. A digital twin model of life-cycle rolling bearing with multiscale fault evolution combined with different scale local fault extension mechanism / T. Li, H. Shi, X. Bai, K. Zhang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 1–11. – DOI: 10.1109/TIM.2023.3243663.

14. Digital twin-assisted dual transfer: a novel information-model adaptation method for rolling bearing fault diagnosis / Z. Li, X. Ding, Z. Song, L. Wang, B. Qin, W. Huang // Information Fusion. – 2024. – Vol. 106. – P. 102271. – DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102271.

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

16. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект). – Ростов н/Д.: Изд-во Дон. гос. техн. ун-та, 2004. – 322 с. – ISBN 5-7890-0307-9.

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

18. *Lapshin V., Turkin I., Dudinov I.* Research on influence of tool deformation in the direction of cutting and feeding on the stabilization of vibration activity during metal processing using metal-cutting machines // Sensors. – 2023. – Vol. 23 (17). – P. 7482. – DOI: 10.3390/s23177482.

19. Sensor-based intelligent tool online monitoring technology: applications and progress / J. Huang, G. Chen, H. Wei, Zh. Chen, Y. Lv // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35 (11). – P. 112001. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad66f1.

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

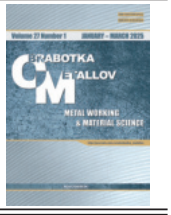
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 106–128
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-106-128

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Predicting machined surface quality under conditions of increasing tool wear

Victor Lapshin [a, *], *Alexandra Gubanova* [b], *Ilya Dudinov* [c]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-5114-0316, lapshin1917@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-9785-5384, anatoliya81@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0009-0009-0784-1287, ilya.sandman@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 29 November 2024
Revised: 19 December 2024
Accepted: 23 January 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Wear
Vibrations
Cutting process
Surface quality

Funding
The study was carried out with the financial support of the RSF grant No. 24-29-00287.

ABSTRACT

Introduction. The most important factor determining the efficiency of metal cutting is the quality of the surface of the part obtained during cutting. The surface quality of a machined part is directly dependent on the vibration activity of the cutting tool, the amplitude of which is influenced by the complex evolutionary dynamics of the cutting process. In light of this, modern digital twin technology, which allows predicting the surface quality values of the parts using virtual models, is becoming an extremely relevant way to improve the efficiency in metalworking control systems. **The purpose of the work.** This study aims to improve the prediction accuracy of a digital twin system for the surface quality of the machined parts under conditions of increasing cutting tool wear. **The paper examines:** the dynamics of the turning process of metal parts, as well as a mathematical model describing the dynamics of tool vibrations during metal machining on lathes, considering the influence of the thermodynamic subsystem of the cutting system. **Research methods.** An experimental approach was employed, utilizing a author-designed measuring stand along with a modern inverted metallographic microscope *LaboMet-I* version 4, equipped with wide-angle lenses 5/20, having a 20 mm linear field of view, and a digital camera for microscopes *Ucam-1400* with a 1.4 μm×1.4 μm matrix, and a contour profile recorder *T4HD*. Furthermore, the study used mathematical modeling of the dynamic cutting system in the *Matlab* environment, for which the authors developed a specialized data processing program. **Results and discussion.** Curves depicting the tool wear rate, changes in the quality parameters of the machined surface as functions of cutting path, and as a function of cutting tool wear are constructed. Dynamic indicators suitable for parametric identification of virtual digital twin models are determined. The structure of these models is established, and parametric identification is performed. Numerical modeling is conducted in the *Matlab* environment, based on the results of which a curve depicting the change in average arithmetic surface roughness as a function of increasing tool wear is constructed. The convergence of the results of field and numerical experiments is evaluated, which shows a high reliability of the surface quality prediction achievable through the use of digital twin systems.

For citation: Lapshin V.P., Gubanova A.A., Dudinov I.O. Predicting machined surface quality under conditions of increasing tool wear. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 106–128. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-106-128. (In Russian).

References

1. Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, 320 p. ISBN 5-217-02976-5.

2. Gimadeev M.P., Li A.A. Analiz avtomatizirovannykh sistem opredeleniya parametrov sherokhovatosti poverkhnosti na osnove dinamicheskogo monitoringa [Analysis of automated surface roughness parameter support systems based on dynamic monitoring]. *Advanced Engineering Research*, 2022, no. 2 (22), pp. 116–129. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.

3. Tugengol'd A.K., Luk'yanov E.A., Voloshin R.N., Bonilla V.F. Intellektual'naya sistema monitoringa i upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem mekhatronnykh tekhnologicheskikh ob"ektov [Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic process facilities]. *Vestnik Donskogo*

*** Corresponding author**
Lapshin Viktor P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Don State Technical University,
1 Gagarin square,
344000, Rostov-on-don, Russian Federation
Tel.: +7 900 122-75-14, **e-mail:** lapshin1917@yandex.ru

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University, 2020, no. 2 (20), pp. 188–195. DOI: 10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195.

4. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, no. 112, pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.

5. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 2014, no. 2 (63), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

6. Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2012. 366 p.

7. Altintaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*, 1995, vol. 1 (44), pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.

8. Kabaldin Y.G., Shatagin D.A. Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital production. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40 (4), pp. 292–296. DOI: 10.3103/S1068798X20040115.

9. Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Tekhnologicheskie aspekty podgotovki tsifrovogo mashinostroitel'nogo proizvodstva [Engineering process aspects of digitalization of machine-building production]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2023, no. 9 (147), pp. 39–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-39-48.

10. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Process control synergetics for metal-cutting machines. *Journal of Vibroengineering*, 2022, vol. 24 (1), pp. 177–189. DOI: 10.21595/jve.2021.22087.

11. Gong S., Li S., Zhang Y., Zhou L., Xia M. Digital twin-assisted intelligent fault diagnosis for bearings. *Measurement Science and Technology*, 2024, vol. 35 (10), p. 106128. DOI: 10.1088/1361-6501/ad5f4c.

12. Zhang Y., Ji J.C., Ren Z., Ni Q., Gu F., Feng K., Yu K., Ge J., Lei Z., Liu Z. Digital twin-driven partial domain adaptation network for intelligent fault diagnosis of rolling bearing. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, vol. 234, p. 109186. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109186.

13. Li T., Shi H., Bai X., Zhang K. A digital twin model of life-cycle rolling bearing with multiscale fault evolution combined with different scale local fault extension mechanism. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, pp. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2023.3243663.

14. Li Z., Ding X., Song Z., Wang L., Qin B., Huang W. Digital twin-assisted dual transfer: a novel information-model adaptation method for rolling bearing fault diagnosis. *Information Fusion*, 2024, vol. 106, p. 102271. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102271.

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

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

17. Lapshin V.P. Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system. *Materials*, 2021, vol. 21 (14), p. 6492. DOI: 10.3390/ma14216492.

18. Lapshin V., Turkin I., Dudinov I. Research on influence of tool deformation in the direction of cutting and feeding on the stabilization of vibration activity during metal processing using metal-cutting machines. *Sensors*, 2023, vol. 17 (23), p. 7482. DOI: 10.3390/s23177482.

19. Huang J., Chen G., Wei H., Chen Zh., Lv Y. Sensor-based intelligent tool online monitoring technology: applications and progress. *Measurement Science and Technology*, 2024, vol. 35 (11), p. 112001. DOI: 10.1088/1361-6501/ad66f1.

20. *Lapshin V.P., Moiseev D.V.* Opredelenie optimal'nogo rezhima obrabotki metallov pri analize dinamiki sistem upravleniya rezaniem [Determination of the optimal metal processing mode when analyzing the dynamics of cutting control systems]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 16–43. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

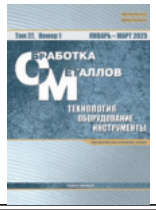
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 129–142
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-129-142

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Проектирование механизма гомогенизации

Юрий Подгорный [1, 2, a, *], *Вадим Скиба* [1, b], *Татьяна Мартынова* [1, c], *Артур Садыкин* [1, d], *Никита Мартюшев* [3, e], *Дмитрий Лобанов* [4, f], *Арина Пелемешко* [1, g], *Андрей Попков* [1, h]

[1] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[2] Новосибирский технологический институт (филиал) Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Красный пр., 35 (ул. Потанинская, 5), г. Новосибирск, 630099, Россия
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия
[4] Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-1664-5351, pjui@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0002-5811-5519, martynova@corp.nstu.ru; [d] https://orcid.org/0009-0002-2061-650X, artur060779@gmail.com;
[e] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru; [f] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru;
[g] https://orcid.org/0009-0004-5916-6782, pyatkova.arina@gmail.com; [h] https://orcid.org/0009-0006-5587-9990, andrej.popkov.2013@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.8, 519.6:539.3

История статьи:
Поступила: 14 декабря 2024
Рецензирование: 09 января 2025
Принята к печати: 31 января 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Гомогенизация
Цикловая диаграмма работы
Кинематическая схема
Кулачковый механизм
Толкатель
Ролик
Скорость
Ускорение
Перемещение
Профиль кулачка

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_25.

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования».

АННОТАЦИЯ

Введение. Производство пищевого оборудования преследует основную цель: создание технологического оборудования высокой эффективности, позволяющего повысить производительность труда при одновременном снижении энергетических затрат. Совершенствование существующего и создание нового высокопроизводительного оборудования для пищевого производства является одной из основных тенденцией развития современного машиностроения. Под гомогенизацией (буквально слово «гомогенизация» означает «повышение однородности») понимают процесс обработки эмульсий, который приводит к дроблению дисперсной фазы. Гомогенизация – это процесс измельчения жидких или пюреобразных пищевых продуктов за счет пропускания их с высокой скоростью и давлением через узкие кольцевые щели. Авторы предлагают для гомогенизации применить механизмы кулачкового типа. Они позволят более рационально распределить время на всасывание и нагнетание продукта. Возможность понижения скорости при нагнетании продукта будет положительно сказываться на процессе гомогенизации. **Цель работы:** снижение потребляемой мощности при гомогенизации. **Методика исследований** основывается на методах ТММ. Они позволили разработать методику синтеза механизма привода гомогенизатора и спроектировать машину, обеспечивающую ее работу в соответствии с предложенной цикловой диаграммой. **Результаты и обсуждения.** Синтез механизмов осуществлялся с учетом полезной нагрузки, которая была определена для существующих отечественных машин при получении плавленого сыра. Так, при заданной производительности 550 л/ч и диаметре плунжера, равном 28 мм, технологическое усилие составило F = 12 315 Н. В соответствии с предложениями авторов было проведено изменение конструкции гомогенизатора за счет внедрения кулачковых механизмов. При проектировании этого привода была предложена новая цикловая диаграмма, позволившая увеличить время на нагнетание продукта и уменьшить время на всасывание. Так, на нагнетание продукта предложено 280°, а на всасывание – 80° по цикловой диаграмме. При этом мощность на приводном валу получили равной P = 2,5 кВт вместо 3,5 кВт для существующей конструкции, имеющей привод от кривошипно-шатунного механизма. В результате потребляемая мощность уменьшилась на 26 %.

Для цитирования: Проектирование механизма гомогенизации / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, А.В. Садыкин, Н.В. Мартюшев, Д.В. Лобанов, А.К. Пелемешко, А.С. Попков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 129–142. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-129-142.

Введение

Производство пищевого оборудования преследует основную цель: создание технологического оборудования высокой эффективности, позволяющего повысить производительность труда при одновременном снижении энергети-

*** Corresponding author**
Подгорный Юрий Ильич, д.т.н., профессор
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: +7 383 346-17-79, **e-mail:** pjui@mail.ru

ческих затрат. На отечественных предприятиях пищевой промышленности насчитывается множество наименований технологического оборудования, в том числе и машины для гомогенизации [1–9]. Современные технологические машины обладают рядом особенностей, среди которых особое место занимают техническое состояние оборудования, его производительность и качество выпускаемой продукции [10–19]. Совершенствование существующего и создание нового высокопроизводительного оборудования для пищевого производства является одной из основных тенденцией развития современного машиностроения. Растущие динамические нагрузки при увеличении рабочих скоростей предъявляют повышенные требования к проектированию отдельных элементов и узлов, в том числе и приводов, обеспечивающих прерывистые движения рабочим органам машины [7, 12–14, 16–22].

Одно из важных требований к этим машинам заключается в том, что их ведомые рабочие звенья должны совершать движения, точно отвечающие определенному закону. Поэтому в механизмах пищевых машин предлагается применить механизмы кулачкового типа. Они позволят распределить время на всасывание и нагнетание продукта. Законы движения кулачковых механизмов можно синтезировать в большом многообразии, и благодаря этому легко приспособить к кинематическим и динамическим требованиям разработчика. Технология получения профиля отработана, и он дает возможность весьма точно осуществить требуемое движение ведомому звену [23–35]. Возможность понижения скорости при нагнетании будет положительно сказываться на процессе гомогенизации [36, 37]. Под гомогенизацией (буквально слово «гомогенизация» обозначает «повышение однородности») понимают процесс обработки эмульсий, который приводит к дроблению дисперсной фазы. Гомогенизация – это процесс измельчения жидких или пюреобразных пищевых продуктов за счет пропускания их с высокой скоростью и давлением через узкие кольцевые щели. Наибольшее распространение процесс гомогенизации получил в пищевой промышленности, а именно в молочной.

Рассмотрим кратко технологический процесс получения плавленого сыра. Плавленый сыр – это пищевой продукт, представляющий собой массу, которая подвергнута процессу плавления и однородного распределения компонентов. Он производится из особых смесей с четкой, конкретной рецептурой, в которой содержится информация об ингредиентах: составные части молока, сливок, масла, сыров, солей-плавителей, стабилизаторов, а также ароматизаторов и вкусовых добавок. Технология изготовления плавленого сыра включает в себя несколько этапов. Сначала сыр или творог измельчается и перемешивается. Затем смесь подвергается плавлению и эмульгированию. Для этого могут использоваться специальные добавки, такие как эмульгирующие соли или структурообразователи, которые помогают достичь консистенции и текстуры продукта.

Проведенный анализ показал, что в конструкциях гомогенизаторов наиболее широко используется кривошипно-шатунные механизмы. Научные исследования [1–7, 12, 13, 36] показывают, что в любом случае ламинарный поток дает троекратное увеличение степени диспергирования жировых шариков по сравнению с турбулентным. Получение сыра производится на специальных машинах, которые называются гомогенизирующими. Индикаторную диаграмму их работы можно подробно просмотреть [36]. Составляющие элементы диаграммы включают моменты всасывания продукта и нагнетания его через щель. Всасывание продукта происходит при давлении ниже атмосферного, а нагнетание – через щель при давлении от 20 МПа и выше. При этом работа кривошипно-шатунного механизма распадается на несколько участков. Первый участок – всасывание, он занимает половину пройденного пути кривошипом. Второй участок, который обеспечивает нагнетание, занимает вторую половину пути. Недостатком таких конструкций является большое потребление мощности. Поэтому мы считаем, что замена кривошипно-шатунного механизма на кулачковый является задачей перспективной, актуальной и своевременной.

***Цель работы*:** снижение потребляемой мощности при гомогенизации продукта.

Для достижения поставленной цели были решены следующие ***задачи***:

– определена технологическая нагрузка при гомогенизации;

– проанализирована возможность замены кривошипно-шатунного механизма привода кулачковым механизмом;

– выбраны необходимые параметры для синтеза кулачковой пары и проведен синтез;

– предложена новая цикловая диаграмма работы устройства;

– определен крутящий момент от сил сопротивления как на каждом кулачковом валу, так и суммарный момент;

– определена мощность, необходимая при гомогенизации с новым приводом.

Методика исследований

Для проведения исследований необходимо прежде всего определиться с технологической нагрузкой, действующей при гомогенизации в процессе получения плавленого сыра. В соответствии с [37] в момент нагнетания жидкости рабочее давление в полости цилиндра составляет 20 Па [37]. Диаметр плунжера при производительности 550 л/час составляет d = 28 мм, частота вращения главного вала n = 180 мин$^{-1}$.

Соответственно необходимое усилие, с которым плунжер давит на жидкость в проходном сечении гомогенизирующей головки, получили равным F = 12 315 Н. Кинетостатический расчет этого механизма показал, что необходимая потребляемая мощность для данного случая составляет 3,8 кВт.

Теперь более подробно исследуем предлагаемую авторами конструкцию гомогенизатора с кулачковым приводом. На рис. 1 показаны расположения приводных кулачков и толкатели, обеспечивающие привод к плунжерам. Функционально все остальные элементы работают так же, как и для приводов с кривошипно-шатунными механизмами. Подробно с работой конструкции гомогенизатора можно ознакомиться в [37].

В механике известно множество законов движения для кулачковых механизмов. Для выбора рационального закона движения мы предлагаем рассмотреть из них три: простой гармонический, двойной гармонический и циклоидальный законы [7, 12, 13–27, 31–35, 38–41].

Расчетная схема для кулачкового механизма приведена на рис. 2. В качестве переменных параметров были приняты профильные углы β; фазовые углы движения для подъема и опускания – φ_1, φ_2, φ_3 и φ_4; максимальные перемещения толкателя – S_{max}; φ – текущее значение угла поворота кулачка. В связи с тем, что все расчеты проводились с использованием математического пакета, для удобства расчетов были введены следующие обозначения: перемещения – $s(\varphi)$; скорости – $v_1(\varphi)$; ускорения – $a_1(\varphi)$; крутящие моменты на рабочем валу – $M_1(\varphi)$, $M_2(\varphi)$ и $M_3(\varphi)$ соответственно для трех кулачков, задействованных в конструкции; $k_1 = \frac{S\,max}{2}$, $k_3 = -S_{max}\frac{6}{\varphi_3^2}$ – коэффициенты для гармониче-

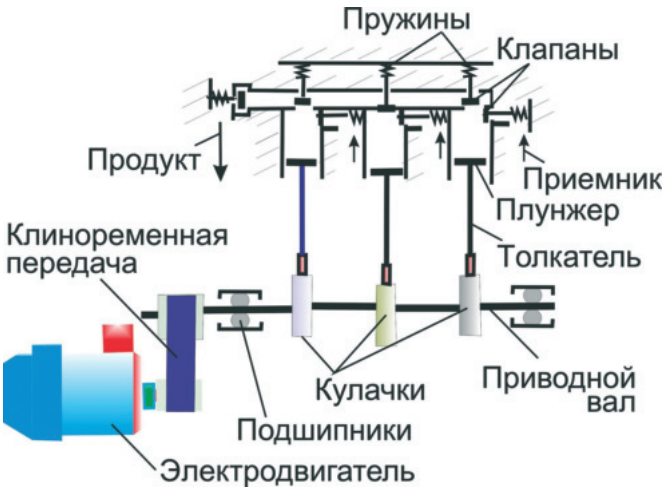


Рис. 1. Предлагаемая конструкция гомогенизатора с приводами от кулачков

Fig. 1. The proposed design of a cam-driven homogenizer

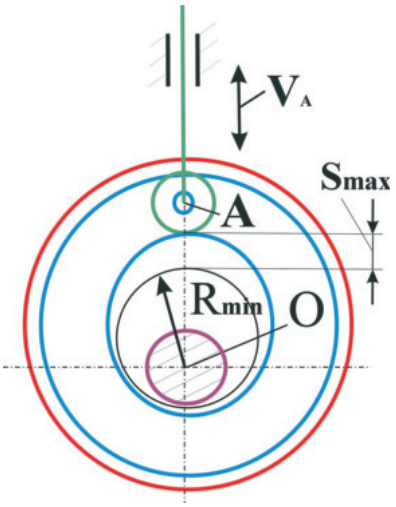


Рис. 2. Кулачковый механизм гомогенизатора

Fig. 2. Cam mechanism of the homogenizer

ского закона движения; F_1, F_2 – полезная нагрузка для моментов нагнетания и всасывания продукта соответственно, значения F_1 = 12 315 Н и F_2 = 2500 Н были приняты для случая получения плавленого сыра.

В результате проведенного исследования было установлено, что наиболее рациональным оказался простой гармонический закон, максимальные значения скоростей для него оказались меньше на 25 и 30 %, чем у двойного гармонического и циклоидального законов соответственно. Аналитическое выражение для этого закона будет иметь следующий вид:

$$s(\varphi) = \frac{S_{\max}}{2}\left(1 - \cos\pi\frac{\varphi}{\beta}\right). \qquad (1)$$

Кинематические характеристики для него были рассчитаны в математическом пакете Mathcad, листинг представлен на рис. 3.

$$a(\varphi) := \begin{cases} k_1 \cdot \frac{\pi}{\varphi 1} \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{\varphi}{\varphi 1}\right) \text{if } 0 \le \varphi \le \varphi_1 \\ 0 \text{if } \varphi_1 \le \varphi \le \varphi_1 + \varphi_2 \\ k_3 \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_3}\right] \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 \le \varphi \le \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \\ 0 \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \le \varphi \le 360\,\text{deg} \end{cases} \qquad (2)$$

Скорость определится:

$$v(\varphi) := \begin{cases} \left[\left(-k_1 \cdot \frac{\pi_1}{\varphi_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{\varphi_1}\right)\right] \text{if } 0 \le \varphi \le \varphi_1 \\ 0 \text{if } \varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2 + \varphi_1 \\ k_3 \cdot \left[\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)\right] \cdot \left[1 - \frac{\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_3}\right] \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 \le \varphi \le \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \\ 0 \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \le \varphi \le 360\,\text{deg} \end{cases} \qquad (3)$$

Рис. 3. Листинг программы для определения кинематических характеристик

Fig. 3. Listing of a program for determining kinematic characteristics

Перемещения были представлены как интегральная функция от скоростей (3):

$$s(\varphi) := \int_0^{\phi} v(\varphi) \cdot d\varphi\,. \qquad (4)$$

Момент, действующий на первый кулачок, предлагается определять согласно программе, разработанной для математического пакета и представленной листингом на рис. 4.

$$M_1(\varphi) := \begin{cases} \left[\left(k1 \cdot \frac{\pi}{\varphi_1}\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1}\right) \cdot F_1\right] \text{if } 0 \le \varphi \le \varphi_1 \\ 0 \text{if } \varphi \le \varphi \le \varphi_1 + \varphi_2 \\ \left[\left[k_3\left(\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)\right) \cdot \left[1 - \frac{\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_3}\right]\right] \cdot F_2 \text{if } (\varphi_1 + \varphi_2) \le \varphi \le \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3\right. \\ 0 \text{if } (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \le \varphi \le 360\,\text{deg} \end{cases}, \qquad (5)$$

Рис. 4. Листинг программы для определения момента на валу кулачка

Fig. 4. Listing of the program for determining the torque on the cam shaft

Крутящие моменты для второго и третьего кулачка можно представить как

$$M_2(\varphi) = M_1(\varphi + \psi_2),$$
$$M_3(\varphi) = M_1(\varphi + \psi_3), \quad (6)$$

где M_2, M_3 – крутящие моменты для второго и третьего кулачка; ψ_1, ψ_2 – фазовые углы смещения для кулачков на приводном валу.

Моменты на приводном валу (кулачковом) определялись в зависимости от величины фазовых смещений углов ψ_i и профильных углов β_i. Суммарный момент M_c на приводном валу был определен как сумма составляющих моментов M_i, которых в нашем случае три. Тогда

$$M_c = \sum_{i=1}^{3} M_i. \quad (7)$$

Потребляемую мощность, приведенную к приводному валу, можно представить следующим образом [34]:

$$P = M_{c\max}\omega, \quad (8)$$

где $M_{c\ max}$ – максимальное значение суммарного крутящего момента.

Профильные углы β определялись ступенчато, с использованием программ, приведенных на рис. 3 и 5. В результате, определив минимальное значение скорости из семейства кривых, мы

$i := 0,5..180$ // Дискретные значения углов

$f_{1i_1} := i_1 \cdot \frac{\pi}{180}$ // Перевод градусной меры в радианную на 1-м участке

$v_{1i_1} := v\left(f_{1i_1}\right)$ // Аналог скорости на 1-м участке

$v_{1\max} := \max(v_1)$ // Аналог максимальной скорости на 1-м участке

$v_{1\max} = 0.01$ // Значение аналога максимальной скорости на 1-м участке

$v_{1;90} = 0.019$ // Значение аналога скороти на 1-м участке при φ=90°

$s_{1i_1} := s(f_{1i_1})$ // Перемещение ведомого звена на 1-м участке

$s_{1\max} := s(90\text{deg})$ // Максимальное перемещение ведомого звена на 1-м участке

$s_{1\max} = 0.015$ // Значение максимального перемещения ведомого звена на 1-м участке

$\varepsilon_2 := \operatorname{atan}\left(\frac{s_{3\max} - s_{1\max}}{v_{1\max} - v_{3\max}}\right)$ // Значение угла на 2-м участке

$\varepsilon_3 := \left(\frac{\pi}{2}\right) - \delta_{dop} + \varepsilon_2$ // Значение угла на 3-м участке

$\varepsilon_1 := 2 \cdot \delta_{dop}$ // Значение угла на 1-м участке

$e_1 := l_{31} \cdot \sin\left(\delta_{dop}\right) - (v_{1\max})$ // Эксцентриситет на 1-м участке

$s_h := l_{31} \cdot \cos(\delta_{dop}) - s_{1\max}$ // Перемещение центра ролика

$s_h = 0.014$ // Значение перемещения центра ролика

$i_3 := 180,185..360$ // Дискретные значения углов

$f_{3i_3} := i_3 \cdot \frac{\pi}{180}$ // Перевод градусной меры в радианную на 3-м участке

$v_{3i_3} := \left|v(f_{3i_3})\right|$ // Аналог скорости на 3-м участке

$v_{3\max} := -\max(v_3)$ // Аналог максимальной скорости на 3-м участке

$v_{3\max} = -0.014$ // Значение аналога максимальной скороти на 3-м участке

$v_{3;\ 70} = 0.014$ // Значение аналога скороти на 3-м участке при φ=70°

$s_{3i_3} := s(f_{3i_3})$ // Перемещение ведомого звена на 3-м участке

$s_{3\max} := s(270\text{deg})$ // Максимальное перемещение ведомого звена на 3-м участке

$s_{3\max} = 0.015$ // Значение максимального перемещения ведомого звена на 3-м участке

$l_{34} := \frac{\left|v_{1\max} - v_{3\max}\right|}{\cos(\varepsilon_2)}$ // Разность максимальных значений аналогов скоростей на участке 3-4 профиля

$\varepsilon_4 := \left(\frac{\pi}{2}\right) - \delta_{dop} - \varepsilon_2$ // Значение угла на 4-м участке

$l_{31} := l_{34} \cdot \frac{\sin(\varepsilon_4)}{\sin(\varepsilon_1)}$ // Разность максимальных значений аналогов скоростей на участке 3-1 профиля

$l_{31} = 0.033$ // Значение разности аналогов скоростей на участке 3-1 профиля

Рис. 5. Листинг программы для определения углов давления δ

Fig. 5. Listing of a program for determining pressure angles δ

остановились на простом гармоническом законе с профильными углами $\beta_1 = 280°$ и $\beta_2 = 80°$ и приступили к проектированию кулачкового механизма по заданным параметрам [12].

Далее углы давления были определены по формуле

$$\delta(\varphi) = a\tan\left(\frac{v(\varphi) + e1}{sh + s(\varphi)}\right). \quad (9)$$

Для этого необходимо было определиться с минимальным радиус-вектором кулачка R_{min}. Используя вычисленные функции положения $s(\varphi)$ и аналоги скоростей $v(\varphi)$ (рис. 6) на фазах подъема и опускания, построили график в координатах $v(s)$ с той лишь разницей, что для его определения используются численные значения скоростей. Такая схема приведена на рис. 7, векторы скоростей обозначены точками от A_0 до A_8. Фаза подъема представлена точками от A_0 до A_4, а фаза опускания – от A_5 до A_8. Значения минимального радиус-вектора кулачка составило $R_{min} = 90$ мм.

Следующим этапом для определения конструктивных параметров механизма является определение радиуса ролика. Алгоритм определения сводится к расчету радиусов кривизны профиля кулачка в зависимости от его угла поворота. Значения радиусов кривизны $\rho_{кр}$ можно представить по общей формуле для кулачка любого типа [23]:

$$\rho_{кр} = \frac{\left[\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\beta}\right)^2\right]^{3/2}}{\rho^2 + 2\left(\frac{d\rho}{d\beta}\right)^2 - \rho\frac{d^2\rho}{d\beta^2}}, \quad (10)$$

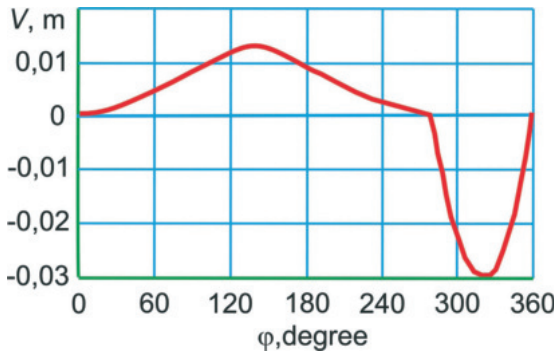


Рис. 6. График аналогов скоростей центра ролика кулачкового механизма

Fig. 6. Graph of analog speeds of the cam mechanism's roller center

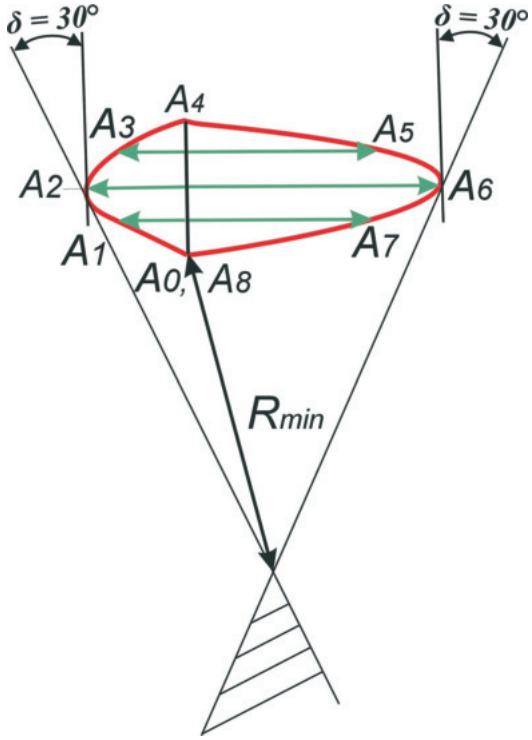


Рис. 7. Схема определения минимального радиус-вектора для механизма с толкателем

Fig. 7. Diagram of determining the minimum radius vector for a mechanism with a pusher

где ρ – радиус-вектор теоретического профиля, β – профильный угол.

В написании программы для определения минимального радиуса кривизны необходимо учесть интерполяцию значений радиус-векторов для перемещений центра ролика кулачкового механизма [12].

Листинг программы для определения кривизны поверхности кулачка приведен на рис. 8.

Результаты и их обсуждение

Анализируя полученные значения потребляемых мощностей, пришли к заключению, что для кривошипно-шатунного механизма она составляет 3,8 кВт. При простом гармоническом законе – 3,8 кВт, при циклоидальном и двойном гармоническом – 4,5 и 4,3 кВт соответственно. Эти значения были рассчитаны при равных профильных углах $\beta = 180°$. Предложение авторов заключается в том, что новая цикловая диаграмма работы кулачкового привода должна обеспечить значительное снижение момента для ведомого звена и, как следствие, привести к по-

$k := 0,5..360$ // Дискретные значения углов

$f := k \cdot \frac{\pi}{180}$ // Перевод градусной меры в радианную

$v := \beta(f)$ // Аналог скорости на k-м участке по оси x

$v := \rho(f)$ // Аналог скорости на k-м участке по оси y

$R := cspline(v, v)$ // Обработка массива значений аналогов скоростей сплайном

$f(x) := interp(R, v, v)$ // Интерполяция массива значений радиус-вектора R

$f'(x) := \frac{d}{dx} f(x)$ // Первая производная от функции $f(x)$

$f''(x) := \frac{d}{dx} f(x)$ // Вторая производная от функции $f(x)$

$\rho(x) := \frac{(f(x) + df(x))}{f(x) + 2 \cdot df(x) - d2f(x) \cdot f(x)}$ // Формула, определяющая радиусы кривизны профиля кулачка

$i := 0,5..280$ // Дискретные значения углов

$f := i \cdot \frac{\pi}{180}$ // Перевод градусной меры в радианную

$\rho := \rho(f)$ // Радиус кривизны профиля кулачка на 1-м участке

$\min(\rho) = 0.03$ // Минимальный радиус кривизны профиля кулачка на 1-м участке

Рис. 8. Листинг программы для определения кривизны поверхности кулачка

Fig. 8. Listing of a program for determining the curvature of the cam surface

нижению потребляемой мощности. Используя алгоритмы расчетов, приведенные на рис. 4, 5, 8, и задавая фазовые углы для всасывания и нагнетания с шагом 20°, получили значения для углов давления. Ниже предлагается вариант расчетов.

Вариант 1. Фазовый угол для момента нагнетания и всасывания составляет 180°. Графики для этого варианта приведены на рис. 9.

Как видно из представленного графика, значения углов давления в точках, равных 70° и 310°, больше допустимых. Поэтому этот вариант неприемлем для конструкции гомогенизатора.

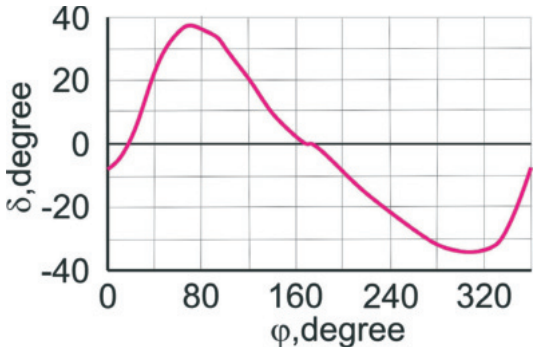


Рис. 9. График изменения углов давления

Fig. 9. Graph of pressure angle variations

В дальнейшем было предложено еще пять вариантов (табл. 1). Из семейства кривых, представленных в табл. 1, только одна кривая удовлетворяет поставленной задаче: углы давления на протяжении полного оборота (360°) этой кривой не превышают допустимого значения, равного 30°.

Эта кривая с фазовыми углами 280° для периода нагнетания продукта и 80° – для всасывания. В дальнейшем, взяв ее параметры за основу, приступили к синтезу кулачка. Для предварительного расчета при синтезе были использованы следующие параметры цикловой диаграммы: на всасывание было отведено 80°, на нагнетание жидкости – 280° от полного оборота кулачка. Для определения моментов на кулачке была использована формула (5). Численные значения сил на участках нагнетания и всасывания приняты F_1 = 12 315 Н и F_2 = 2500 Н соответственно. Для одного из вариантов графики моментов при фазовых углах смещения ψ_1 = 170° и ψ_2 = 340° представлены на рис. 10. Фиолетовым цветом обозначен суммарный момент, который действует на приводном валу. Для остальных вариантов они сведены в табл. 2.

Таблица 1
Table 1

Варианты для исследования углов давления
Options for the study of pressure angles

№ п/п	Фазовые углы		Значения максимальных углов давления, град.
	φ, град. (всасывание)	φ, град. (нагнетание)	
1	200	160	32
2	220	140	33
3	240	120	32
4	260	100	31
5	280	80	25

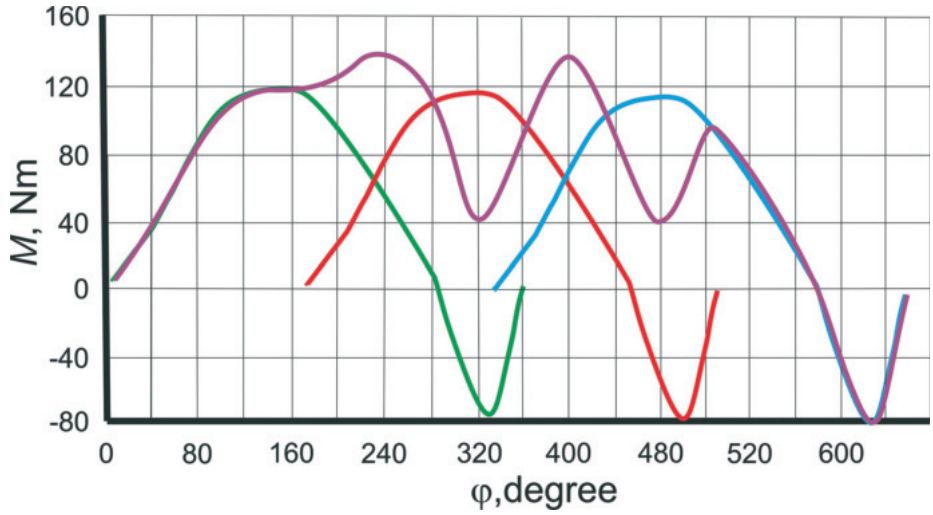


Рис. 10. Графики моментов с фазовым углом смещения $\psi_1 = 170°$ и $\psi_2 = 340°$:
– суммарный момент на приводном валу; – крутящий момент для первого кулачка; – крутящий момент для второго кулачка; – крутящий момент для третьего кулачка

Fig. 10. Graphs of torques with a phase displacement angle $\psi_1 = 170°$ and $\psi_2 = 340°$:
– total torque on the drive shaft; – torque for the first cam; – torque for the second cam; – torque for the third cam

Таблица 2
Table 2

Значения моментов на приводном валу
Torque values on the drive shaft

№ п/п	Фазовые углы		Значения моментов на приводном валу, Н·м
	φ, град. (всасывание)	φ, град. (нагнетание)	
1	120	240	185
2	140	260	186
3	160	280	185
4	180	300	186
5	170	340	137

Как видно из приведенной табл. 2, только один из вариантов (вариант 5) имеет минимальное значение суммарного момента на распределительном валу, он же представлен на рис. 10.

Проведя подробное исследование для различных вариантов, можно приступить к синтезу кулачкового механизма со следующими параметрами: для нагнетания и всасывания приняты 280° и 80° по цикловой диаграмме; ход толкателя – 30 мм; минимальный радиус кривизны – 90 мм.

Перемещения и скорости были определены в соответствии с листингом на рис. 3 и выражением (4). Перемещения представлены на рис. 11, профиль кулачка – на рис. 12.

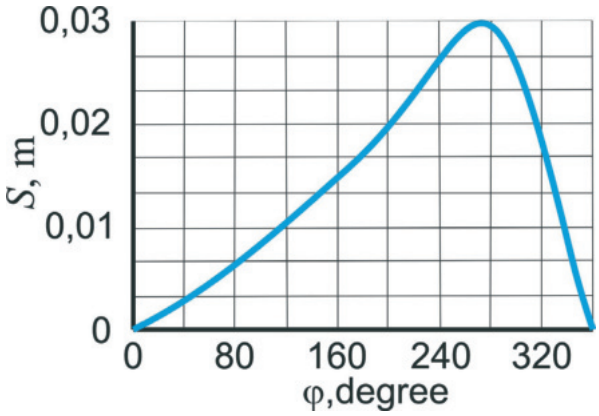


Рис. 11. График изменения перемещений

Fig. 11. Graph of displacement variations

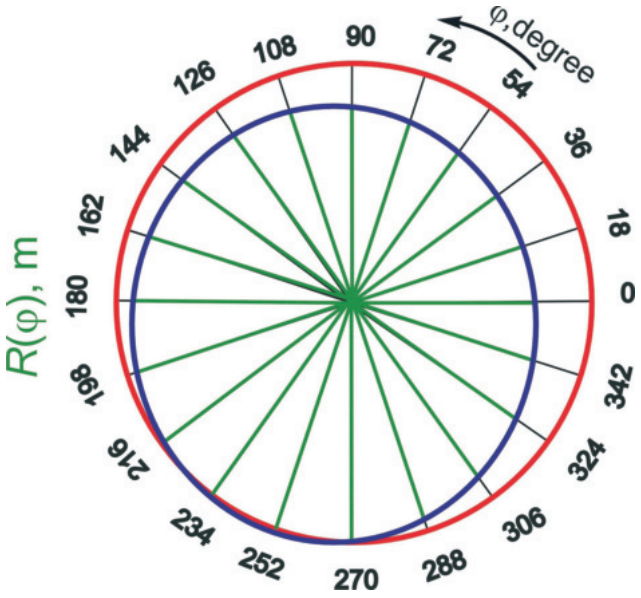


Рис. 12. Профиль кулачка

Fig. 12. Cam profile

Заключение

Основной целью, которая была поставлена в работе, является снижение потребляемой мощности гомогенизатором.

Используя аналитические зависимости (1–4) и задавая некоторые численные значения для параметров кулачкового механизма, выбрали наиболее рациональный закон движения толкателя в виде простой гармонической кривой, которая имеет минимальные значения скоростей из рассмотренного семейства математических кривых. Амплитудные значения аналогов скоростей составили в положительной области 0,012 м, а в отрицательной области –0,03 м. Углы давления для этой кривой во всем исследуемом диапазоне углов не превышают допустимых значений δ = 30°. Представленные зависимости крутящих моментов на приводном валу свидетельствуют о целесообразности их углов смещения, равных $\psi_1 = 170°$ и $\psi_2 = 340°$. При этом величина суммарного крутящего момента составила 137 Н·м, а мощность на приводном валу получили равной $P = 2{,}5$ кВт вместо 3,5 кВт для существующей конструкции, имеющий привод от кривошипно-шатунного механизма. Это указывает на то, что потребляемая мощность уменьшилась на 26 %.

Список литературы

1. *Inguva P., Grasselli S., Heng P.W.S.* High pressure homogenization – An update on its usage and understanding // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – Vol. 202. – P. 284–302. – DOI: 10.1016/j.cherd.2023.12.026.

2. *Chen X., Liang L., Xu X.* Advances in converting of meat protein into functional ingredient via engineering modification of high pressure homogenization // Trends in Food Science & Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 12–29. – DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.032.

3. *Chevalier-Lucia D., Picart-Palmade L.* High-pressure homogenization in food processing // Green food processing techniques / ed. by F. Chemat, E. Vorobiev. – Elsevier: Academic Press, 2019. – P. 139–157. – DOI: 10.1016/B978-0-12-815353-6.00005-7.

4. The influence mechanism of pH and polyphenol structures on the formation, structure, and digestibility of pea starch-polyphenol complexes via high-pressure homogenization / D. Luo, J. Fan, M. Jin, X. Zhang, J. Wang, H. Rao, W. Xue // Food Research International. – 2024. – Vol. 194. – P. 114913. – DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114913.

5. Optimization of olive oil based O/W nanoemulsions prepared through ultrasonic homogenization: a response surface methodology approach / T. Mehmood, A. Ahmad, A. Ahmed, Z. Ahmed // Food Chemistry. – 2017. – Vol. 229. – P. 790–796. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.03.023.

6. Comparative study of oil-in-water emulsions encapsulating fucoxanthin formulated by microchannel emulsification and high-pressure homogenization / Z. Ma, Y. Zhao, N. Khalid, G. Shu, M.A. Neves, I. Kobayashi, M. Nakajima // Food Hydrocolloids. – 2020. – Vol. 108. – P. 105977. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105977.

7. *Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г.* Технологическое оборудование: расчет и проектирование. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2024. – 107 с. – ISBN 978-5-7782-5308-7. – EDN DEIRZT.

8. Recent advances in design and stability of double emulsions: trends in Pickering stabilization / E. Tenorio-Garcia, A. Araiza-Calahorra, E. Simone, A. Sarkar // Food Hydrocolloids. – 2022. – Vol. 128. – P. 107601. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107601.

9. Emulsifier functionality and process engineering: progress and challenges / A.L.R. Costa, A. Gomes, C.C.P. Andrade, R.L. Cunha // Food Hydrocolloids. – 2017. – Vol. 68. – P. 69–80. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.012.

10. *Скиба В.Ю., Иванцивский В.В.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5. – EDN PKBFNF.

11. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99. – EDN SMYRYJ.

12. Исследование и выбор параметров при проектировании технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, О.В. Максимчук. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 260 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-4177-0. – EDN VZWWWY.

13. *Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю.* Синтез технологических машин. Расчет и конструирование. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 240 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-4912-7. – DOI: 10.17212/978-5-7782-4912-7. – EDN TVPPKR.

14. *Flores P., Souto A.P., Marques F.* The first fifty years of the mechanism and machine theory: standing back and looking forward // Mechanism and Machine Theory. – 2018. – Vol. 125. – P. 8–20. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.11.017.

15. Topology and dimension synchronous optimization design of 5-DoF parallel robots for in-situ machining of large-scale steel components / K. Chen, M. Wang, X. Huo, P. Wang, T. Sun // Mechanism and Machine Theory. – 2023. – Vol. 179. – P. 105105. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105105.

16. *Eckhardt H.D.* Kinematic design of machines and mechanisms. – 1st ed. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 620 p. – ISBN 0070189536. – ISBN 978-0070189539.

17. *Erdman A.G., Sandor G.N.* Mechanism design: analysis and synthesis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2001. – 688 p. – ISBN 0130408727. – ISBN 978-0130408723.

18. *Hsieh J.-F.* Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes // Mechanism and Machine Theory. – 2014. – Vol. 81. – P. 155–165. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.

19. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review / B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, R. Wang // Mechanism and Machine Theory. – 2012. – Vol. 143. – P. 103622. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.

20. *Dresig H., Vul'fson I.I.* Dynamik der mechanismen. – Wien; New York: Springer, 1989. – 328 p. – ISBN 978-3-7091-9036-4. – DOI: 10.1007/978-3-7091-9035-7.

21. *Фролов К.В.* Теория механизмов и машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 496 с.

22. *Vulfson I.* Dynamics of cyclic machines. – Cham: Springer International, 2015. – 390 p. – ISBN 978-3-319-12633-3. – DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

23. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин: учебник для втузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с. – ISBN 5-02-013810-X.

24. *Rothbart H.A.* Cam design handbook. – New York: McGraw-Hill Professional, 2003. – 606 p. – ISBN 0071377573. – ISBN 978-0875841830.

25. *Faxin L., Xianzhang F.* The design of parallel combination for cam mechanism // Procedia Environmental Sciences. – 2011. – Vol. 10, pt. B. – P. 1343–1349. – DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.215.

26. *Sateesh N., Rao C.S.P., Janardhan Reddy T.A.* Optimisation of cam-follower motion using B-splines // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2009. – Vol. 22 (6). – P. 515–523. – DOI: 10.1080/09511920802546814.

27. *Myszka D.H.* Machines & mechanisms: applied kinematic analysis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2012. – 376 p. – ISBN 0132157802. – ISBN 978-0132157803.

28. S&A – Expert system for planar mechanisms design / H. Varbanov, T. Yankova, K. Kulev, S. Lilov // Ex-

pert Systems with Applications. – 2006. – Vol. 31 (3). – P. 558–569. – DOI: 10.1016/j.eswa.2005.09.081.

29. *Ondrášek J.* The synthesis of a hook drive cam mechanism // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 92. – P. 320–329. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.

30. *Mott R.L.* Machine elements in mechanical design. – 5th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013. – 816 p. – ISBN 0135077931. – ISBN 978-0135077931.

31. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series / C. Zhoua, B. Hua, S. Chen, L. Mac // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Vol. 104. – P. 118–129. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

32. *Тир К.В.* Комплексный расчет кулачковых механизмов. – М.: Машгив, 1958. – 380 с.

33. Kinematic analysis of crank-cam mechanism of process equipment / Yu.I. Podgornyj, V.Yu. Skeeba, T.G. Martynova, N.S. Pechorkina, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – P. 042080. – DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042080.

34. Проектирование кулачкового механизма с учетом технологической нагрузки и энергетических затрат / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, П.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 2 (75). – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.

35. Motion laws synthesis for cam mechanisms with multiple follower displacement / Yu.I. Podgornyj, V.Yu. Skeeba, A.V. Kirillov, T.G. Martynova, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – P. 042079. – DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042079.

36. *Фиалкова Е.А.* Гомогенизация. Новый взгляд. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 386 с. – ISBN 5-98879-032-1.

37. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 1: учебник для вузов / под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2001. – 703 с. – ISBN 5-06-004168-9.

38. *Fomin A., Paramonov M.* Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 871–877. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.

39. To the theory of mechanisms subfamilies / A. Fomin, L. Dvornikov, M. Paramonov, A. Jahr // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124. – P. 012055. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.

40. *Неклютин Д.А.* Оптимальное проектирование кулачковых механизмов на ЭВМ. – М.: Алмата, 1977. – 215 с.

41. *Тартаковский И.И.* Некоторые задачи синтеза оптимальных законов движения // Машиностроение. – 1971. – № 2. – С. 39–43.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

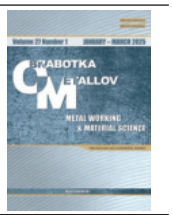
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 129–142
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-129-142

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Designing the homogenization mechanism

Yuriy Podgornyj [1, 2, a, *], *Vadim Skeeba* [1, b], *Tatyana Martynova* [1, c], *Artur Sadykin* [1, d], *Nikita Martyushev* [3, e], *Dmitry Lobanov* [4, f], *Arina Pelemeshko* [1, g], *Andrey Popkov* [1, h]

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2] Novosibirsk Technological Institute (branch) A.N. Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), 35 Krasny prospekt (5 Potaninskayast.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation
[3] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation
[4] I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-1664-5351, pjui@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0002-5811-5519, martynova@corp.nstu.ru; [d] https://orcid.org/0009-0002-2061-650X, artur060779@gmail.com;
[e] https://orcid.org/0000-0003-0620-9561, martjushev@tpu.ru; [f] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru;
[g] https://orcid.org/0009-0004-5916-6782, pyatkova.arina@gmail.com; [h] https://orcid.org/0009-0006-5587-9990, andrej.popkov.2013@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 14 December 2024
Revised: 09 January 2025
Accepted: 31 January 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Homogenization
Cycle diagram of operation
Kinematic scheme
Cam mechanism
Pusher
Roller
Speed
Accelerations
Motions
Cam profile

Funding
This study was supported by a NSTU grant (project No. TP-PTM-1_25).

Acknowledgements
The research was carried out at the equipment of the Engineering Center "Design and Production of High-Tech Equipment".

ABSTRACT

Introduction. The primary goal of food processing equipment manufacturing is to create highly efficient process equipment that can increase labor productivity while reducing energy costs. Improving existing and creating new high-performance equipment for food production is one of the main trends in the development of modern mechanical engineering. The term "homogenization" literally means "increasing uniformity". In the context of emulsions, homogenization refers to the process of treating emulsions, which leads to the fragmentation of the dispersed phase. Homogenization is the process of grinding liquid or mashed foods by passing it at high speed and pressure through narrow annular slots. The authors propose to use cam-type mechanisms for homogenization. Cam-type mechanisms allow for a more efficient allocation of the time for the product suction and injection. The homogenization process benefits from the potential to reduce the speed during product injection. **The purpose of the work** is to reduce power consumption during homogenization. **The research methods** are based on the theory of machines and mechanisms. These methods enabled developing a methodology for synthesizing the homogenizer drive mechanism and designing a machine that ensures its operation in accordance with the proposed cycle diagram. **Results and discussion.** The synthesis of mechanisms is executed with consideration for the workload, which was calculated for existing domestic machines in the production of processed cheese. Thus, with a given production capacity of 550 l/h and a plunger diameter of 28 mm, the technological force is $F = 12315$ N. In accordance with the authors' proposals, the design of the homogenizer is modified by introducing cam mechanisms. In the design of this drive, a novel cycle diagram is proposed, enabling an increase in product injection time and a reduction in suction time. According to the novel cycle diagram, 280° is proposed for product injection and 80° for suction. In this case, the power on the drive shaft is equal to $P = 2.5$ kW instead of 3.5 kW for the existing design, driven by a crank mechanism. The power consumption is decreased by 26 %.

For citation: Podgornyj Y.I., Skeeba V.Y., Martynova T.G., Sadykin A.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Pelemeshko A.K., Popkov A.S. Designing the homogenization mechanism. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 129–142. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-129-142. (In Russian).

References

1. Inguva P., Grasselli S., Heng P.W.S. High pressure homogenization – An update on its usage and understanding. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, vol. 202, pp. 284–302. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.12.026.

*** Corresponding author**
Podgornyj Yuriy I., D.Sc. (Engineering), Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel: +7 383 346-17-79,**e-mail:** pjui@mail.ru

2. Chen X., Liang L., Xu X. Advances in converting of meat protein into functional ingredient via engineering modification of high pressure homogenization. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, vol. 106, pp. 12–29. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.032.

3. Chevalier-Lucia D., Picart-Palmade L. High-pressure homogenization in food processing. *Green food processing techniques*. Ed. by F. Chemat, E. Vorobiev. Elsevier, Academic Press, 2019, pp. 139–157. DOI: 10.1016/B978-0-12-815353-6.00005-7.

4. Luo D., Fan J., Jin M., Zhang X., Wang J., Rao H., Xue W. The influence mechanism of pH and polyphenol structures on the formation, structure, and digestibility of pea starch-polyphenol complexes via high-pressure homogenization. *Food Research International*, 2024, vol. 194, p. 114913. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114913.

5. Mehmood T., Ahmad A., Ahmed A., Ahmed Z. Optimization of olive oil based O/W nanoemulsions prepared through ultrasonic homogenization: a response surface methodology approach. *Food Chemistry*, 2017, vol. 229, pp. 790–796. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.03.023.

6. Ma Z., Zhao Y., Khalid N., Shu G., Neves M.A., Kobayashi I., Nakajima M. Comparative study of oil-in-water emulsions encapsulating fucoxanthin formulated by microchannel emulsification and high-pressure homogenization. *Food Hydrocolloids*, 2020, vol. 108, p. 105977. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105977.

7. Podgornyj Y.I., Skeeba V.Y., Martynova T.G. *Tekhnologicheskoe oborudovanie: raschet i proektirovanie* [Technological equipment: calculation and design]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2024. 107 p. ISBN 978-5-7782-5308-7.

8. Tenorio-Garcia E., Araiza-Calahorra A., Simone E., Sarkar A. Recent advances in design and stability of double emulsions: trends in Pickering stabilization. *Food Hydrocolloids*, 2022, vol. 128, p. 107601. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107601.

9. Costa A.L.R., Gomes A., Andrade C.C.P., Cunha R.L. Emulsifier functionality and process engineering: progress and challenges. *Food Hydrocolloids*, 2017, vol. 68, pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.012.

10. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie: povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei pri integratsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-7782-3690-5.

11. Podgornyj Yu.I., Skeeba V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. *Modelirovanie nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin* [Modeling of the technological machines support systems]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 91–99.

12. Podgornyj Yu.I., Skeeba V.Yu., Martynova T.G., Maksimchuk O.V. *Issledovanie i vybor parametrov pri proektirovanii tekhnologicheskikh mashin* [Analysis and choice of parameters in designing technological machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2020. 260 p. ISBN 978-5-7782-4177-0.

13. Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu. *Sintez tekhnologicheskikh mashin. Raschet i konstruirovanie* [Synthesis of technological machines. calculation and design]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2023. 240 p. ISBN 978-5-7782-4912-7. DOI: 10.17212/978-5-7782-4912-7.

14. Flores P., Souto A.P., Marques F. The first fifty years of the mechanism and machine theory: standing back and looking forward. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, vol. 125, pp. 8–20. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.11.017.

15. Chen K., Wang M., Huo X., Wang P., Sun T. Topology and dimension synchronous optimization design of 5-DoF parallel robots for in-situ machining of large-scale steel components. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, vol. 179, p. 105105. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105105.

16. Eckhardt H.D. *Kinematic design of machines and mechanisms*. 1st ed. New York, McGraw-Hill, 1998. 620 p. ISBN 0070189536. ISBN 978-0070189539.

17. Erdman A.G., Sandor G.N. *Mechanism design: analysis and synthesis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2001. 688 p. ISBN 0130408727. ISBN 978-0130408723.

18. Hsieh J.-F. Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, vol. 81, pp. 155–165. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.

19. Zhu B., Zhang X., Zhang H., Liang J., Zang H., Li H., Wang R. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, vol. 143, p. 103622. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.

20. Dresig H., Vul'fson I.I. *Dynamik der mechanismen*. Wien, New York, Springer, 1989. 328 p. ISBN 978-3-7091-9036-4. DOI: 10.1007/978-3-7091-9035-7.

21. Frolov K.V. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 496 p.

22. Vulfson I. *Dynamics of cyclic machines*. Cham, Springer International, 2015. 390 p. ISBN 978-3-319-12633-3. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

23. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin: uchebnik dlya vtuzov* [Theory of mechanisms and machines]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. ISBN 5-02-013810-X.

24. Rothbart H.A. *Cam design handbook*. New York, McGraw-Hill Professional, 2003. 606 p. ISBN 0071377573. ISBN 978-0875841830.

25. Faxin L., Xianzhang F. The design of parallel combination for cam mechanism. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 10, pt. B, pp. 1343–1349. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.215.

26. Sateesh N., Rao C.S.P., Janardhan Reddy T.A. Optimisation of cam-follower motion using B-splines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2009, vol. 22 (6), pp. 515–523. DOI: 10.1080/09511920802546814.

27. Myszka D.H. *Machines & mechanisms: applied kinematic analysis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2012. 376 p. ISBN 0132157802. ISBN 978-0132157803.

28. Varbanov H., Yankova T., Kulev K., Lilov S. S&A – Expert system for planar mechanisms design. *Expert Systems with Applications*, 2006, vol. 31 (3), pp. 558–569. DOI: 10.1016/j.eswa.2005.09.081.

29. Ondrášek J. The synthesis of a hook drive cam mechanism. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 92, pp. 320–329. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.

30. Mott R.L. *Machine elements in mechanical design*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2013. 816 p. ISBN 0135077931. ISBN 978-0135077931.

31. Zhoua C., Hua B., Chen S., Mac L. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 104, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

32. Tir K.V. *Kompleksnyi raschet kulachkovykh mekhanizmov* [Complex calculation of cam mechanisms]. Moscow, Mashgiv Publ., 1958. 380 p.

33. Podgornyj Yu.I., Skeeba V.Yu., Martynova T.G., Pechorkina N.S., Skeeba P.Yu. Kinematic analysis of crank-cam mechanism of process equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, p. 042080. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042080.

34. Podgornyj Yu.I., Skeeba V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Skeeba P.Yu. Proektirovanie kulachkovogo mekhanizma s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki i energeticheskikh zatrat [Cam mechanism designing with account of the technological load and energy costs]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 2 (75), pp. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.

35. Podgornyj Yu.I., Skeeba V.Yu., Kirillov A.V., Martynova T.G., Skeeba P.Yu. Motion laws synthesis for cam mechanisms with multiple follower displacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, p. 042079. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042079.

36. Fialkova E.A. *Gomogenizatsiya. Novyi vzglyad* [Homogenization. A new look]. St. Petersburg, GIORD Publ., 2006. 386 p. ISBN 5-98879-032-1.

37. Panfilov V.A., ed. *Mashiny i apparaty pishchevykh proizvodstv*. V 2 kn. Kn. 1 [Machines and apparatus for food production. In 2 bk. Bk. 1]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 703 p. ISBN 5-06-004168-9.

38. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 871–877. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.

39. Fomin A., Dvornikov L., Paramonov M., Jahr A. To the theory of mechanisms subfamilies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, p. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.

40. Neklyutin D.A. *Optimal'noe proektirovanie kulachkovykh mekhanizmov na EVM* [Optimal design of cam mechanisms on a computer]. Moscow, Almata Publ., 1977. 215 p.

41. Tartakovskii I.I. Nekotorye zadachi sinteza optimal'nykh zakonov dvizheniya [Some problems of synthesis of optimal laws of motion]. *Mashinostroenie = Mechanical Engineering*, 1971, no. 2, pp. 39–43.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

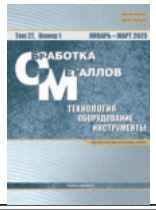
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 143–154
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-143-154

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Повышение эксплуатационных свойств деталей из серого чугуна с помощью ионной имплантации

Ольга Усанова [1, a], ***Анна Рязанцева*** [1, b, *], ***Марина Вахрушева*** [2, c], ***Марина Модина*** [3, d], ***Юлия Кузнецова*** [3, e]

[1] Московский политехнический университет, ул. Б. Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия
[2] Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, 665709, Россия
[3] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-4399-5074, olus2000@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-6558-3089, rav300576@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0002-6118-9527, mvahr@yandex.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-2482-5472, marishamodina@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-1388-6125, julx@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787.4:669.13

История статьи:
Поступила: 30 сентября 2024
Рецензирование: 19 октября 2024
Принята к печати: 21 ноября 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Ионная имплантация
Микроструктура
Микродюрометрический анализ
Фазовый состав
Рентгеноструктурный анализ

АННОТАЦИЯ

Введение. Существует широкий спектр методов для улучшения свойств чугуна при помощи разнообразных технологий. Пример таких методов – нанесение защитного покрытия TiN, нормализация чугуна, нанесение диффузионных карбидсодержащих покрытий и др. Однако эти методы имеют недостатки: изменение размеров после обработки, слабое сцепление покрытия с материалом подложки. В нашей работе мы рассмотрели один из наиболее перспективных и современных методов – ионную имплантацию. **Целью работы** является изучение влияния имплантации с различными дозами ионов азота (для определения оптимального режима) для изменения поверхностных и механических свойств чугуна. **Методы.** Образцы чугуна были имплантированы ионами азота различными дозами для выбора наиболее оптимального режима (оптимальной дозы имплантированных ионов азота как нитридообразующего элемента). Исследована микроструктура поверхности образцов чугуна после обработки с помощью сканирующего электронного микроскопа «Стереоскан S-180» при увеличении 2900, 5000 крат. Выполнен микродюрометрический анализ образцов с помощью металлографического микроскопа Neophot-2, оснащенного приставкой для измерения микротвердости, при нагрузке 10 г после имплантации образцов чугуна различными дозами ионов азота. Был также осуществлен рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-3 для определения фазового состава и тонкой структуры модифицированных образцов чугуна. **Результаты и обсуждение.** Ионная имплантация образцов чугуна значительно повышает микротвердость. Так, в результате проведенных исследований установлено, что наилучшие механические свойства (микротвердость) наблюдаются у образцов чугуна после имплантации ионами N^+ с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и энергией 40 КэВ. Рентгеноструктурный анализ показал, что в результате имплантации ионами азота образуются нитриты Fe_2N и Fe_3N, а также наблюдаются изменения в тонкой структуре (средняя плотность дислокации и величина блоков мозаики).

Для цитирования: Повышение эксплуатационных свойств деталей из серого чугуна с помощью ионной имплантации / О.Ю. Усанова, А.В. Рязанцева, М.Ю. Вахрушева, М.А. Модина, Ю.С. Кузнецова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 143–154. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-143-154.

Введение

Чугун обладает рядом свойств, делающих его незаменимым при изготовлении различных деталей [1], например поршневых колец, втулок, деталей турбин и др. Прочностные свойства дают возможность его использования для изготовления элементов, которые подвергаются большим нагрузкам, и деталей, выдерживающих воздействие воды и пара. Однако существует проблема улучшения поверхностных свойств чугуна (износостойкости, коррозионной стойкости и др.).

Существует множество способов дополнительно улучшить свойства чугуна с помощью различных технологий [2–4], таких как нанесение защитного покрытия нитрида титана [5], нормализация чугуна [6], нанесение диффузионных карбидсодержащих покрытий [7] и др. Однако у этих методов есть недостаток: плохое

***Адрес для переписки**
Рязанцева Анна Владимировна, к.т.н., доцент
Московский политехнический университет,
ул. Б. Семеновская, 38,
107023, г. Москва, Россия
Тел.: +7 967 114-12-30**, e-mail:** rav300576@mail.ru

сцепление покрытия с материалом подложки (чугуном) [8–10].

Для улучшения свойств чугуна и усиления его поверхности, а также для создания качественного сцепления между поверхностным слоем и основным материалом предлагается применить метод ионной имплантации [11–13]. Ионная имплантация – это технология, которая позволяет изменять свойства материалов, «бомбардируя» их поверхность высокоэнергетическими ионами. В случае чугуна в качестве «снарядов» используются ионы различных элементов, которые встраиваются в его поверхностный слой. В результате ионной имплантации образуется не просто покрытие, а глубоко измененный сплав с переменным составом. Этот сплав отличается от обычных покрытий отсутствием четкой границы между исходным материалом и модифицированным слоем. Вместо резкого перехода мы видим плавное изменение состава и свойств в глубину материала. Такое плавное изменение состава дает возможность достигать более равномерного распределения улучшенных свойств по глубине модифицированного слоя. Исследования показывают, что толщина такого измененного слоя может достигать 150…200 мкм, что делает ионную имплантацию отличным инструментом для повышения износостойкости и прочности деталей [14, 15].

Использование метода ионной имплантации обеспечивает улучшение механических свойств материала, увеличивая его твердость, прочность и износостойкость. Этот процесс также способствует улучшению адгезии между поверхностным слоем и основным материалом, что повышает стойкость к коррозии и воздействию внешних факторов [16–18]. Ионная имплантация широко применяется в промышленности для модификации свойств различных материалов, таких как различные стали и сплавы, включая чугун. Этот метод является эффективным способом улучшения качества поверхности и общих характеристик материала, что делает его привлекательным для использования в различных отраслях, где требуется повышение износостойкости, твердости, усталостной прочности, коррозионной стойкости и других поверхностных свойств материалов [19–22].

Ионная имплантация, несмотря на свою эффективность, не лишена определенных сложностей. Одна из ключевых проблем заключается в непредсказуемости ее результатов. В отличие от других методов обработки материалов, где влияние параметров на свойства легко моделируется, ионная имплантация характеризуется значительной вариабельностью результатов. Это обусловлено тем, что в процессе имплантации ионы взаимодействуют с материалом на атомном уровне, а их поведение под воздействием разных условий может быть довольно сложным. До сих пор не существует универсальной модели, которая бы полностью описывала механизм упрочнения от ионной имплантации и позволяла с точностью предсказывать результат. Часто оказывается, что ионы ведут себя не в соответствии с предполагаемыми закономерностями, что приводит к необходимости тщательной экспериментальной проверки каждого конкретного случая [23]. Однако необходимо отметить, что успешность процесса зависит от технологических параметров, таких как доза и энергия ионов. Несмотря на сложности, связанные с предсказуемостью и результатами процесса, ионная имплантация остается важным методом для улучшения свойств материалов и создания новых функциональных поверхностей. Важно правильно выбирать технологические параметры для достижения желаемых результатов и дальнейшего применения этого метода [24, 25].

Для решения проблемы упрочнения поверхностного слоя чугунных изделий и деталей необходимо провести предварительные исследования, которые покажут закономерности формирования структуры и свойств имплантированных поверхностей. ***Целью данной работы*** стало определение технологических параметров обработки поверхности заготовок из чугуна с помощью ионной имплантации (оптимальной дозы излучения и энергии пучка), позволяющих повысить прочностные свойства поверхностного слоя. Для достижения поставленной цели были решены следующие ***задачи***.

1. Определен оптимальный режим ионной имплантации азота в серый чугун, установлена оптимальная доза излучения и энергия пучка для достижения максимальной прочности поверхностного слоя.

2. Изучено влияние ионной имплантации на микроструктуру серого чугуна. Проведен анализ изменений в микроструктуре, таких как раз-

дробление перлитных колоний, формирование диффузионного слоя и выгорание графитовых включений.

3. Проведена оценка изменения микротвердости поверхности чугуна после имплантации. Определена зависимость микротвердости от дозы имплантации и анализ ее распределения по глубине модифицированного слоя.

4. Определен фазовый состав и тонкая структура имплантированного слоя. Идентифицированы фазы, образующиеся в результате имплантации. Проведен анализ изменений в средней плотности дислокаций и величине блоков мозаики.

Методика исследований

Исследование микроструктуры опытного чугуна

Микроструктуру имплантированного серого чугуна (типа СЧ20 перлитной структуры, химический состав приведен в табл. 1) изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа «Стереоскан S-180» с разрешающей способностью до 60 Å на образцах 10×10×10 мм (рис. 1) после травления в 3%-й HNO_3. Образцы были вырезаны в направлении, перпендикулярном имплантированному слою, и исследовалась при увеличении ×2900, 5000.

Талица 1
Table 1

Состав чугуна
The composition of cast iron

Элемент	C	Si	Mn	Cr	P	S
Процентное содержание, %	3,45	2,2	0,8	0,32	0,1	0,12

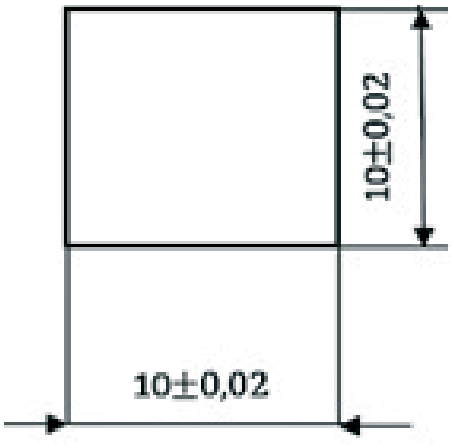


Рис. 1. Схема образца серого чугуна
Fig. 1. Gray cast iron sample diagram

Исследование чугуна после имплантации методом микродюрометрии

Для дюрометрических исследований использовали образцы, полученные при трех режимах обработки (с дозами 10^{17}, $2{\cdot}10^{17}$ и $5{\cdot}10^{17}$ ион/см^2 и с энергией имплантации 40 КэВ). Исследования проводили на приборе Neophot-2 (нагрузка составляла 10 г).

Микротвердость измеряли в направлении от имплантированной поверхности к центру на образцах, вырезанных перпендикулярно имплантированному слою. Значения микротвердости по глубине слоя определялось как среднее арифметическое пяти измерений.

Исследование фазового состава поверхности чугуна после имплантации

Рентгеноструктурные исследования выполнялись на дифрактометре ДРОН-3. Рентгеновский анализ проводился в излучении CoKα.

Известно, что собственно имплантированный слой в толщину составляет всего около 1000 Å [26–28]. Помимо специально применимых приборов съемки, задачу фазового анализа облегчило и то обстоятельство, что самые интенсивные линии фаз, ожидаемых в имплантированных слоях (нитриды, карбиды и др.), находятся в диапазоне малых углов отражения. В силу геометрии съемки на малых углах рентгеновские лучи проходят в поверхностном слое более длинный путь, чем на углах, близких к 90°, за счет чего увеличивается отражающий объем образующихся фаз.

Несмотря на то что интенсивность дифракционных линий фаз в имплантированных слоях во много раз меньше интенсивностей линий матрицы, удалось провести идентификацию фаз.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура опытного чугуна

Микроструктура имплантированных металлов и сплавов контролируется процессами, протекающими в любом пересыщенном твердом растворе, и специфическими эффектами, характерными для имплантированной поверхности металла.

В результате ионной имплантации происходит не просто нанесение поверхностного покрытия, а глубокое изменение структуры материала. Вместо четкой границы между новым слоем и исходным материалом, как это бывает при обычном напылении, образуется переходная зона. В этой зоне состав материала постепенно меняется от исходного чугуна к модифицированному слою, обогащенному атомами азота. Этот изменяющийся состав создает градиент свойств, где твердость и другие механические характеристики плавно переходят от исходных значений к улучшенным параметрам, достигнутым благодаря ионной имплантации (рис. 2). Тем не менее из фотографий микроструктуры поверхностного слоя видно, что на поверхности имплантированного образца сформировался диффузионный слой толщиной около 400 мкм. В данном слое практически полностью отсутствуют графитовые включения. Они начинают появляться только в конце этого слоя и в небольшом количестве.

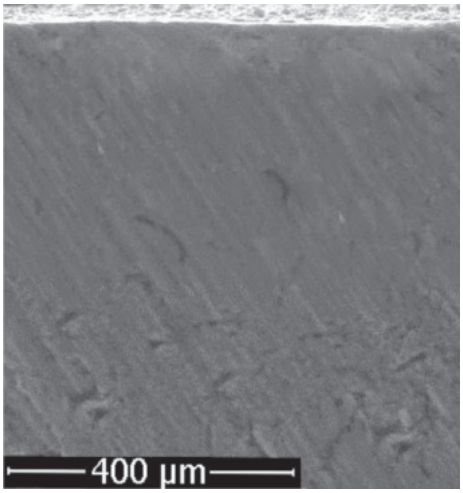
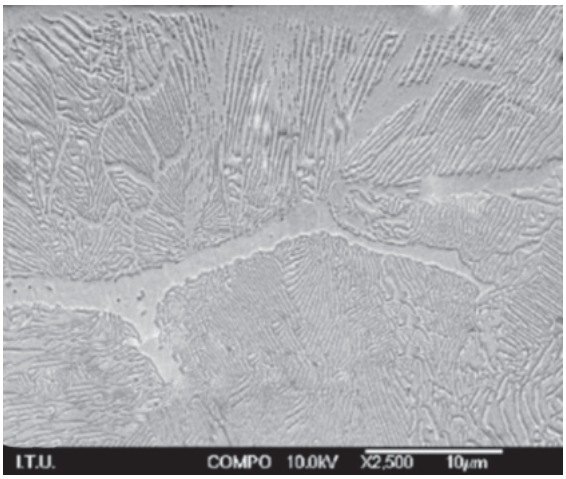


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя чугуна, имплантированного ионами N^+

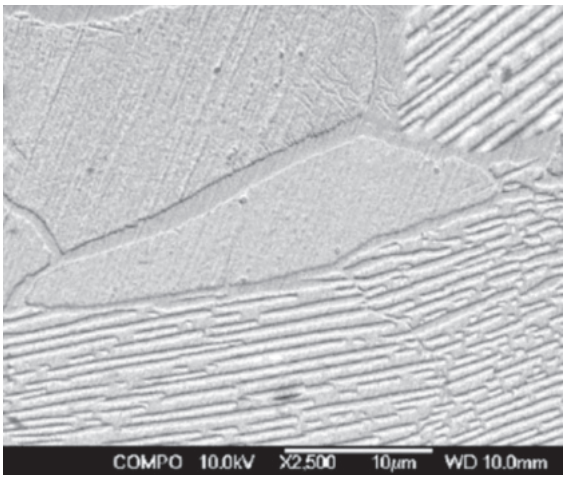
Fig. 2. Microstructure of the surface layer of cast iron implanted with N^+ ions

В структуре серого чугуна происходит выгорание графита под воздействием ионов азота. Подобные результаты были получены и авторами работы [29]. В этой работе азотирование поверхности серого чугуна при других режимах также приводило к выгоранию включений графита в поверхностном слое образцов.

Имплантация ионами азота (N^+) в приповерхностную область серого чугуна приводит к существенным изменениям его микроструктуры. В первую очередь происходит раздробление и разориентация перлитных колоний, которые являются характерной особенностью микроструктуры серого чугуна. Микроструктура имплантированного чугуна представлена на рис. 3.



а



а

Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя чугуна, имплантированного ионами N^+:
а – $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2; *б* – $1 \cdot 10^{17}$ ион/см^2

Fig. 3. Microstructure of the surface layer of cast iron implanted with N^+ ions:
a – $2 \cdot 10^{17}$ ion/cm^2; *б* – $1 \cdot 10^{17}$ ion/cm^2

Изменения в микроструктуре поверхностного слоя после ионной имплантации имеют решающее значение для определения различных свойств поверхности (микротвердости, износостойкости и др.).

Микродюрометрический анализ чугуна после имплантации

Микродюрометрический анализ показал, что в результате ионной имплантации происходит повышение микротвердости (табл. 2, рис. 4, 5, 6).

Из табл. 2 и графиков (рис. 4, 5, 6) видно, что твердость у поверхности существенно возрастает и при удалении от поверхности постепенно понижается до 2500 МПа. Снижение происходит до значения, характерного для исходного состояния, до имплантации.

Таким образом, максимальное значение микротвердости поверхности наблюдается у образцов после имплантации ионами азота с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Следовательно, это является оптимальной дозой ионной имплантации для образцов чугуна (типа СЧ20), что показано при данных условиях исследований.

Увеличение микротвердости в приповерхностном слое связано с образованием в нем большого количества специфических радиационных дефектов – таких как, например, пары Френкеля,

Талица 2
Table 2

Результаты микродюрометрического анализа чугуна после имплантации

Results of microdurometry analysis of cast iron after implantation

Доза излучения, ион/см^2	Значение твердости, МПа
0	2500
10^{17}	18 500
$2 \cdot 10^{17}$	20 500
$5 \cdot 10^{17}$	24 000

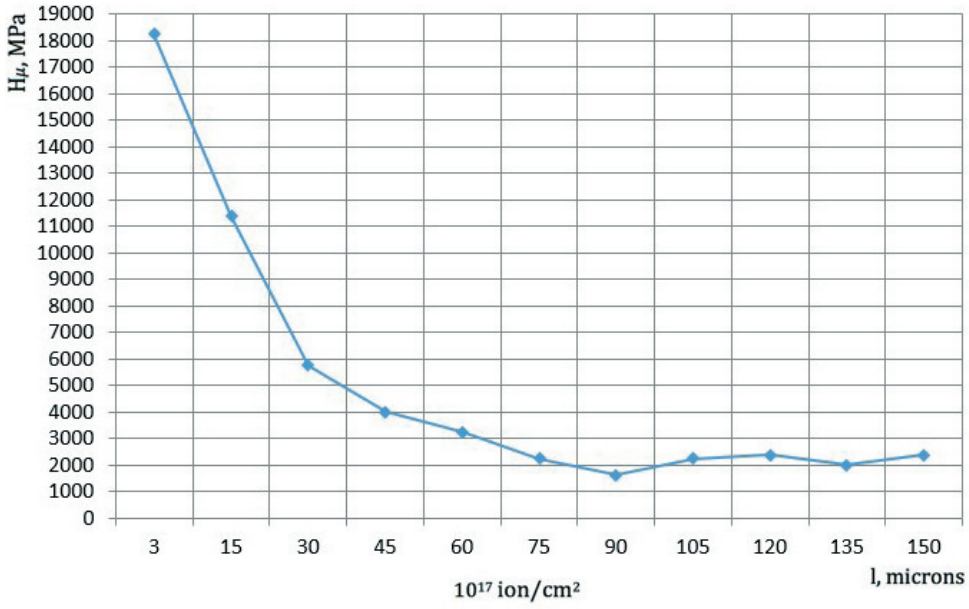


Рис. 4. Изменение микротвердости чугуна, имплантированного ионами азота с дозой 10^{17} ион/см^2

Fig. 4. Change in microhardness of cast iron implanted with nitrogen ions at a dose of 10^{17} ion/cm^2

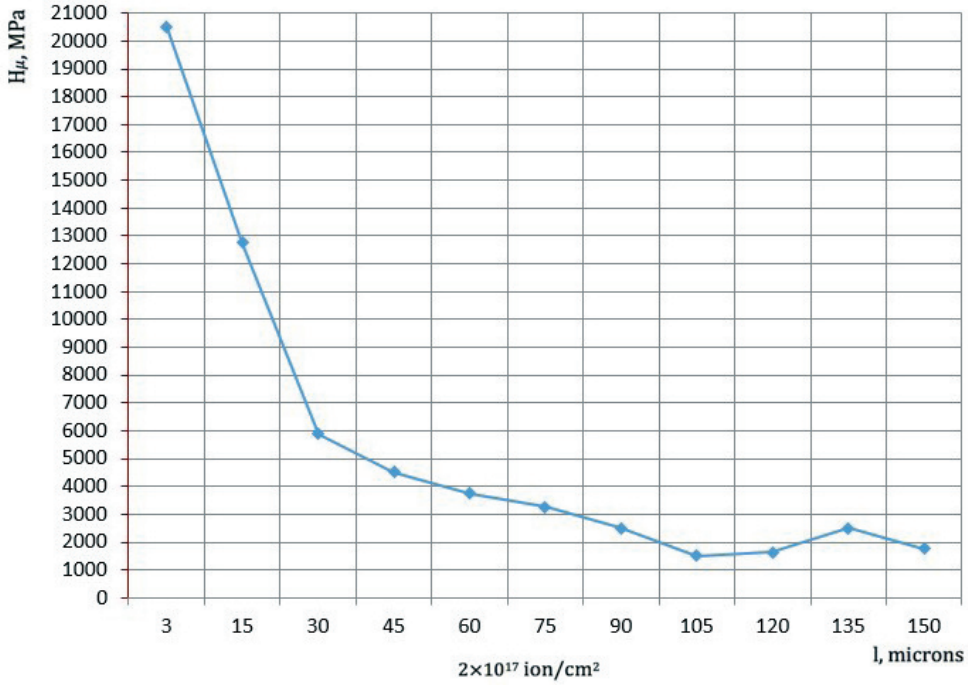


Рис. 5. Изменение микротвердости чугуна, имплантированного ионами азота с дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2

Fig. 5. Change in microhardness of cast iron implanted with nitrogen ions at a dose of $2 \cdot 10^{17}$ ion/cm^2

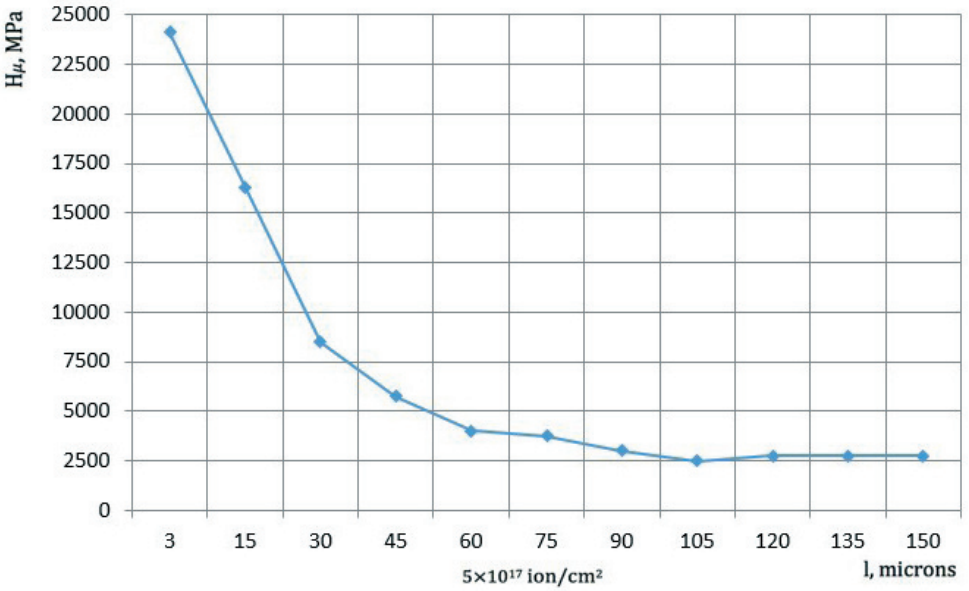


Рис. 6. Изменение микротвердости чугуна, имплантированного ионами азота с дозой $5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2

Fig. 6. Change in microhardness of cast iron implanted with nitrogen ions at a dose of $5 \cdot 10^{17}$ ion/cm^2

и образуемых фаз, в данном случае нитридов, которые, как известно, имеют высокое значение твердости (микротвердости).

Анализируя полученные данные о твердости поверхностного слоя образцов и данные, полученные по результатам микроструктурного анализа (при различных мощностях излучения), можно увидеть, что толщина имплантированного слоя азота в наших образцах из серого чугуна напрямую зависит от дозы имплантации. Чем больше доза излучения, тем шире слой. Однако зависимость не носит линейный характер.

По-видимому, с увеличением дозы имплантации толщина слоя может достичь насыщения, когда все доступные междоузлия в кристаллической решетке железа будут заполнены атомами азота. Так, рост твердости для имплантированного слоя при мощности $1 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 начинается примерно с 75 мкм от поверхности, для $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 – с 90 мкм от поверхности, для $5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 – также примерно с 90…100 мкм от поверхности. Аналогичная картина наблюдается и для твердости ближайшего к поверхности слоя. Увеличение мощности излучения с 10^{17} до $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 дало прирост твердости примерно на 2000 МПа. Дальнейшее увеличение мощности излучения с $2 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 дало прирост твердости этого слоя уже на 3500 МПа.

Результаты рентгеноструктурного анализа

Рентгеновский анализ проводился для определения фазового состава и изучения тонкой структуры (средняя плотность дислокаций и величина блоков мозаики). Этот анализ продемонстрировал, что при ионной имплантации азота в серый чугун происходит образование новых фаз. Ионы азота, проникая в материал, вступают в химические реакции с атомами железа (Fe), составляющими матрицу чугуна. В результате этих взаимодействий образуются нитриды железа. Среди них преобладает фаза Fe_3N, нитрид железа (III). Кроме нее в меньшем количестве присутствует нитрид железа (II) – Fe_2N. Образование этих нитридов является следствием процесса ионной имплантации и оказывает существенное влияние на свойства поверхностного слоя чугуна, увеличивая его твердость и износостойкость. Увеличение дозы N^+ с 10^{17} до $2 \cdot 10^{17}$ не приводит к изменению фазового состава.

Исследования также показали, что после имплантации величина блоков мозаики (О.К.Р.) уменьшается по сравнению с исходным необработанным состоянием. Причем наибольшее выраженное уменьшение наблюдается у образцов после имплантации с дозой $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 (табл. 3).

Ионная имплантация азотом вносит существенные изменения в структуру чугуна, в его приповерхностный слой. Одним из ключевых изменений является повышение плотности дислокаций в этом слое по сравнению с исходным материалом, который не подвергался обработке. Дислокации, являющиеся дефектами кристаллической решетки, влияют на механические свойства материалов. Их повышенная концентрация, обусловленная ионной имплантацией, приводит к увеличению твердости и прочности. Это подтверждается наблюдениями, показывающими, что самая высокая средняя плотность дислокаций наблюдается именно у образцов, имплантированных с наибольшей дозой азота – $5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 (табл. 3). Важно отметить, что именно эта доза признана оптимальной в настоящем исследовании, так как она обеспечивает наиболее эффективное повышение прочностных свойств без ухудшения других характеристик.

Таким образом, рентгеноструктурный анализ показал, что после имплантации ионами азота происходит повышение средней плотности дислокаций и уменьшение величины блоков мозаики, что в конечном итоге объясняет улучшение поверхностных свойств образцов данного вида чугуна.

Талица 3

Table 3

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов до и после имплантирования ионами N^+

Results of X-ray diffraction analysis of samples before and after implantation with N^+ ions ions

Тип чугуна	Мощность излучения, ион/см^2	О.К.Р. $(D \pm \Delta D)$ см $\cdot 10^{-4}$	Средняя плотность дислокации $(\rho \pm \Delta\rho) \cdot 10^9$, см$^{-2}$	Фазовый состав
СЧ	0 (исходный образец)	2,0 ± 0,12	0,75 ± 0,5	α-Fe
	10^{17} ион/см^2	1,5 ± 0,08	1,3 ± 0,1	α-Fe, Fe_3N, Fe_2N
	$2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2	0,9 ± 0,03	3,7 ± 0,6	α-Fe, Fe_3N, Fe_2N
	$5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2	0,6 ± 0,03	4,8 ± 0,6	α-Fe, Fe_3N, Fe_2N

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что ионная имплантация азотом является эффективным методом повышения прочностных свойств деталей из серого чугуна.

1. По итогам работы показано, что оптимальным режимом имплантации в условиях настоящего исследования является доза $5 \cdot 10^{17}$ ион/см². При этой дозе наблюдается максимальное повышение микротвердости, достигающее 24 000 МПа, что значительно превосходит исходное значение (2500 МПа).

2. Ионная имплантация приводит к существенным изменениям в микроструктуре чугуна. Образуется диффузионный слой толщиной около 400 мкм, в котором практически отсутствуют графитовые включения. Происходит раздробление и разориентация перлитных колоний, характерных для исходной структуры серого чугуна.

3. В результате имплантации азота изменяется фазовый состав поверхностного слоя, формируются нитриды Fe_2N и Fe_3N. Наблюдается увеличение средней плотности дислокаций и уменьшение величины блоков мозаики.

Таким образом, применение ионной имплантации азота с оптимальной дозой позволяет получить упрочненный слой на поверхности чугуна с сохранением заданных размеров деталей. Полученные результаты открывают возможности для практического применения ионной имплантации в промышленности с целью повышения долговечности и надежности деталей из серого чугуна, используемых в различных областях техники.

Список литературы

1. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces / N.V. Martyushev, V.N. Kozlov, M. Qi, V.S. Tynchenko, R.V. Kononenko, V.Yu. Konyukhov, D.V. Valuev // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 4529. – DOI: 10.3390/ma16134529.

2. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeeba, N.V. Martyushev, P.Yu. Skeeba // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 132–137. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.132.

3. *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.

4. 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.

5. *Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Kolishchak L.M.* Investigation of the effect of ion implantation on tribotechnical characteristics of cast iron // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2373 (2). – P. 022029. – DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022029.

6. Влияние ионной имплантации на свойства чугуна, используемого в конструкциях горнодобывающих машин и аппаратов / О.Ю. Усанова, А.В. Рязанцева, О.Б. Сенникова, С.Д. Корнеев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 912–920. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-912-920.

7. Ni-hard-class cast irons, prospects for their improvement / A. Issagulov, M. Ibatov, P. Kovalyov, E. Shcherbakova, A. Dostaeva, S. Arinova // Труды Университета. – 2021. – № 2 (83). – С. 47–51. – DOI: 10.52209/1609-1825_2021_2_47.

8. *Konyuhov V.Y., Gladkih A.M., Semenov V.V.* Measures to the improvement of efficiency of a repair enterprise // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1353. – P. 012046. – DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012046.

9. Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection / A.K. Sherov, B. Myrzakhmet, K.T. Sherov, B.N. Absadykov, M.R. Sikhimbayev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2022. – Vol. 1 (451). – P. 159–166. – DOI: 10.32014/2022.2518-170X.153.

10. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, M.V. Grechneva, V.V. Kondrat'ev, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – P. 0120123.

11. Improvement of wear and hardness of steel by nitrogen implantation / A.A. Youssef, P. Budzynski, J. Filiks, A.P. Kobzev, J. Sielanko // Vacuum. – 2004. – Vol. 77 (1). – P. 37–45.

12. *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.

13. *Sudjatmoko L.S., Wirjoadi B.S.* Effects of nitrogen ion implantation on hardness and wear resistance of the Ti-6Al-4V alloy // Jurnal Iptek Nuklir Ganendra = Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology. – 2015. – Vol. 18 (2). – P. 61–68.

14. *Bosikov I.I., Modina M.A., Khekert E.V.* Analysis of the quality of underground mineral waters of terrigenous deposits of the hauteriv-barremian aquifer of the lower cretaceous // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences 2024. – Vol. 2. – P. 36–47. – DOI: 10.32014/2024.2518-170X.392.

15. *Ershov V.A., Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V.* Determination of aluminum oxide concentration in molten cryolite-alumina // Metallurgist. – 2013. – Vol. 57 (3–4). – P. 346–351.

16. Mathematical modeling of thermofrictional milling process using ANSYS WB software / K.T. Sherov, M.R. Sikhimbayev, A.K. Sherov, B.S. Donenbayev, A.K. Rakishev, A.B. Mazdubai, M.M. Musayev, A.M. Abeuova // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2017. – Vol. 47 (2). – P. 24–33. – DOI: 10.1515/jtam-2017-0008.

17. *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.

18. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents / N.V. Plotnikova, V.Yu. Skeeba, R.A. Miller, N.S. Rubtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156 (1). – P. 012022. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

19. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V.V. Ivancivsky, V.Yu. Skeeba, I.A. Bataev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156 (1). – P. 012025. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

20. Снижение биокоррозии деталей оборудования, эксплуатируемого в подземных выработках за счет применения детонационного Ti-Cu напыления / У.В. Харченко, В.С. Егоркин, В.В. Сирота, С.В. Зайцев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 336–344. – DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-336-344.

21. *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.

22. *Шарипзянова Г.Х., Еремеева Ж.В.* Управление эксплуатационными свойствами порошковых материалов для повышения коррозионной стойкости и износостойкости деталей // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 443–449. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-443-449.

23. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhrushev, A.K. Zhigulev // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

24. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production / V.V. Kondrat'ev, V.A. Ershov, S.G. Shakhrai, N.A. Ivanov, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60 (7–8). – P. 877–882.

25. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining / V.S. Brigida, V.I. Golik, R.V. Klyuev, L.B. Sabirova, A.R. Mambetalieva, Yu.I. Karlina // Metallurgist. – 2023. – Vol. 67 (3–4). – P. 398–408. – DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

26. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing / V.I. Golik, R.V. Klyuev, D.A. Zyukin, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2023. – Vol. 67 (1–2). – P. 96–103. – DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5.

27. Complex metallographic researches of 110G13L steel after heat treatment / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, V.V. Kondrat'ev, S.A. Nebogin, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). – P. 012014.

28. *Akst E.R.* Structural and phase transformations in cast irons when implanted into the surface layers of nitrogen ions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 86 (1). – P. 012038. – DOI: 10.1088/1757-899X/86/1/012038.

29. *Мищук Л.Н., Юдина Т.Ю.* Изучение микроструктуры, химического состава и свойств поверхностной зоны высокопрочных чугунов после азотирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 84–90.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 143–154
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-143-154

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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

Improving the performance characteristics of grey cast iron parts via ion implantation

Olga Usanova [1, a], *Anna Ryazantseva* [1, b, *], *Marina Vakhrusheva* [2, c], *Marina Modina* [3, d], *Yulia Kuznetsova* [3, e]

[1] Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation
[2] Bratsk State University, 40 Makarenko Str., Bratsk, 665709, Russian Federation
[3] Admiral Ushakov Maritime State University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-4399-5074, olus2000@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-6558-3089, rav300576@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0002-6118-9527, mvahr@yandex.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-2482-5472, marishamodina@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-1388-6125, julx@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 30 September 2024
Revised: 19 October 2024
Accepted: 21 November 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Cast iron
Ion implantation
Microstructure
Microradiometric analysis
Phase composition
X-ray diffraction analysis

ABSTRACT

Introduction. Cast iron is a material that is widely used in various industries. It possesses high heat capacity, relatively high hardness, and a number of other physical, mechanical and technological properties. Due to the significant operational stress experienced by the working surfaces of cast iron parts and its frequent exposure to aggressive environments, additional surface treatment is required to enhance wear resistance, corrosion resistance, and other properties. There are many different methods of surface modification. One of the most promising and modern ones is ion implantation with various ions. The **purpose of the work** is thus to study the effect of ion implantation on the surface of cast iron and the resulting changes in its mechanical properties. **Methods.** Cast iron samples were implanted with nitrogen ions of different doses (optimal dose of implanted nitrogen ions as a nitride-forming element). The surface microstructure of cast iron samples was investigated using a scanning electron microscope *Stereoscan S-180* at a magnification of ×2,900 and ×5,000. Microdurometry analysis of the samples was carried out using a *Neophot-2* metallographic microscope equipped with an attachment for measuring microhardness, at a load of 10 g after implantation of cast iron samples with various doses of nitrogen ions. In addition, X-ray diffraction analysis was performed on a *DRON-3* diffractometer to determine the phase composition and fine structure of modified cast iron samples. **Results and Discussion.** Ion implantation of cast iron samples significantly increases microhardness. Thus, the conducted study reveals that the best mechanical properties (specifically microhardness) are observed in cast iron samples after implantation by N^+ ions with a dose of 5×10^{17} ions/cm^2 with energy of 40 KeV. X-ray diffraction analysis demonstrated that the ion implantation with nitrogen results in the formation of Fe_2N and Fe_2N nitrites, and also revealed changes in fine structure (average dislocation density and size of mosaic blocks).

For citation: Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Vakhrusheva M.Yu., Modina M.A., Kuznetsova Yu.S. Improving the performance characteristics of grey cast iron parts via ion implantation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 143–154. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-143-154. (In Russian).

References

1. Martyushev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Tynchenko V.S., Kononenko R.V., Konyukhov V.Yu., Valuev D.V. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 4529. DOI: 10.3390/ma16134529.

2. Zverev E.A., Skeeba V.Yu., Martyushev N.V., Skeeba P.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.

*** Corresponding author**
Ryazantseva Anna V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Moscow Polytechnic University,
38 B. Semenovskaya str.,
107023, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 967 114-12-30, **e-mail:** rav300576@mail.ru

3. 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.

4. 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.

5. Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Kolishchak L.M. Investigation of the effect of ion implantation on tribotechnical characteristics of cast iron. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2373 (2), p. 022029. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022029.

6. Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Sennikova O.B., Korneev S.D. Vliyanie ionnoi implantatsii na svoistva chuguna, ispol'zuemogo v konstruktsiyakh gornodobyvayushchikh mashin i apparatov [Ionic implantation influence on the properties of cast iron used in the structures of mining machines and devices]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15 (4), pp. 912–920. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-912-920.

7. Issagulov A., Ibatov M., Kovalyov P., Shcherbakova E., Dostaeva A., Arinova S. Ni-hard-class cast irons, prospects for their improvement. *Trudy Universiteta = University Proceedings*, 2021, no. 2 (83), pp. 47–51. DOI: 10.52209/1609-1825_2021_2_47.

8. Konyuhov V.Y., Gladkih A.M., Semenov V.V. Measures to the improvement of efficiency of a repair enterprise. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1353, p. 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012046.

9. Sherov A.K., Myrzakhmet B., Sherov K.T., Absadykov B.N., Sikhimbayev M.R. Method for selecting the location of the clearance fields of the landing surfaces of gear pump parts with a biaxial connection. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2022, vol. 1 (451), pp. 159–166. DOI: 10.32014/2022.2518-170X.153.

10. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Grechneva M.V., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411, p. 012012.

11. Youssef A.A., Budzynski P., Filiks J., Kobzev A.P., Sielanko J. Improvement of wear and hardness of steel by nitrogen implantation. *Vacuum*, 2004, vol. 77 (1), pp. 37–45.

12. Usanova O.Yu., Stolyarov V.V., Ryazantseva A.V. Issledovanie svoistv ionno-implantirovannogo titanovogo splava s pamyat'yu formy, ispol'zuemogo v konstruktsiyakh gornodobyvayushchego oborudovaniya [Investigation of the properties of ion-implanted shape memory titanium alloy used in the construction of mining equipment]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2022, vol. 14 (4), pp. 695–701. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-695-701.

13. Sudjatmoko L.S., Wirjoadi B.S. Effects of nitrogen ion implantation on hardness and wear resistance of the Ti-6Al-4V alloy. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra = Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology*, 2015, no. 18 (2), pp. 61–68.

14. Bosikov I.I., Modina M.A., Khekert E.V. Analysis of the quality of underground mineral waters of terrigenous deposits of the Hauteriv-Barremian aquifer of the lower cretaceous. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 2024, vol. 2, pp. 36–47. DOI: 10.32014/2024.2518-170X.392.

15. Ershov V.A., Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V. Determination of aluminum oxide concentration in molten cryolite-alumina. *Metallurgist*, 2013, vol. 57 (3–4), pp. 346–351.

16. Sherov K.T., Sikhimbaev M.R., Sherov A.K., Donenbayev B.S., Rakishev A.K. Mazdubai A.B., Musayev M.M., Abeuova A.M. Mathematical modeling of thermofrictional milling process using ANSYS WB software. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, vol. 47 (2), pp. 24–33. DOI: 10.1515/jtam-2017-0008.

17. 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.

18. Plotnikova N.V., Skeeba V.Yu., Miller R.A., Rubtsova N.S. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156 (1), p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

19. Ivancivsky V.V., Skeeba V.Yu., Bataev I.A., Sakha O.V., Khlebova I.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 (1), p. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

20. Kharchenko U.V., Egorkin V.S., Sirota V.V., Zaitsev S.V. Snizhenie biokorrozii detalei oborudovaniya, ekspluatiruemogo v podzemnykh vyrabotkakh za schet primeneniya detonatsionnogo Ti-Cu napyleniya [Reducing equipment parts biocorrosion operated in underground minings due to the detonation Ti-Cu spraying application]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2024, vol. 16 (1), pp. 336–344. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-336-344.

21. 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.

22. Sharipzyanova G.Kh., Eremeeva Zh.V. Upravlenie ekspluatatsionnymi svoistvami poroshkovykh materialov dlya povysheniya korrozionnoi stoikosti i iznosostoikosti detalei [Control of the operational properties of powder materials to increase the corrosion resistance and wear resistance of parts]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*, 2023, vol. 15 (2), pp. 443–449. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-443-449.

23. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.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.

24. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production. *Metallurgist*, 2016, vol. 60 (7–8), pp. 877–882.

25. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*, 2023, vol. 67 (3–4), pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

26. Golik V.I., Klyuev R.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. *Metallurgist*, 2023, vol. 67 (1–2), pp. 96–103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5.

27. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Kondrat'ev V.V., Nebogin S.A., Karlina A.I. Complex metallographic researches of 110G13L steel after heat treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411 (1), p. 012014.

28. Akst E.R. Structural and phase transformations in cast irons when implanted into the surface layers of nitrogen ions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 86 (1), p. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/86/1/012038.

29. Mishchuk L.N., Yudina T.Yu. Izuchenie mikrostruktury, khimicheskogo sostava i svoistv poverkhnostnoi zony vysokoprochnykh chugunov posle azotirovaniya [Investigating microstructure, chemical composition and surface layer properties of heavy-duty cast iron after nitriding]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2018, no. 4, pp. 84–90.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

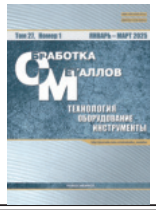
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 155–171
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-155-171

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Получение нанокомпозиционного материала с матрицей на основе алюминиевого сплава Al-7Si методом механического замешивания в стальную литейную форму с переменной толщиной стенок и исследование его характеристик

Халед Абдельазиз [1, 2, a], *Далия Сабер* [1, 3, b, *]

[1] Кафедра материаловедения, Факультет машиностроения, Университет Загазига, Загазиг, 44519, Египет
[2] Кафедра машиностроения, Инженерный колледж, Университет Таиф, Таиф, 21944, Саудовская Аравия
[3] Программа промышленного инжиниринга, Кафедра машиностроения, Инженерный колледж, Университет Таиф, Таиф, 21944, Саудовская Аравия

[a] https://orcid.org/0000-0001-9139-548X, kalidelaziz@gmail.com; [b] https://orcid.org/0000-0002-7349-1723, daliasaber13@yahoo.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.2(075)

История статьи:
Поступила: 26 октября 2024
Рецензирование: 15 ноября 2024
Принята к печати: 28 декабря 2024
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Металломатричные композиты (ММК)
Толщина стенки литейной формы
Наночастицы TiO_2
Механические свойства

АННОТАЦИЯ

Введение. Сплав Al-7Si является одним из ключевых алюминиевых сплавов, поскольку обладает удачным сочетанием литейных и механических свойств. Металломатричные композиты (ММК), армированные керамическими частицами, находят широкое применение в высокотехнологичных отраслях, таких как военная, автомобилестроительная, аэрокосмическая и электротехническая промышленность. **Целями** данного исследования являются: (1) изучение возможности получения композиционных материалов на основе сплава Al-7Si, армированных различным количеством наночастиц TiO_2, с применением метода механического замешивания; (2) исследование влияния толщины стенки литейной формы на микроструктуру и механические свойства сплава Al-7Si в процессе затвердевания; (3) анализ влияния содержания армирующего компонента на механические свойства и износостойкость полученных композиционных материалов. **Методология.** Методом механического замешивания были изготовлены металломатричные композиционные материалы на основе сплава Al-7Si, содержащие 0, 2, 4 и 6 масс. % наночастиц TiO_2. Для металлографических и механических испытаний были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 15 мм и длиной 18 мм. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что скорость затвердевания возрастает с увеличением толщины стенки литейной формы. Это приводит к росту скорости охлаждения и, как следствие, к формированию более мелкозернистой структуры. Микроструктура отливки демонстрирует изменение размера зерна от мелкого к крупному при переходе от внешней поверхности (прилегающей к внутренней стенке формы) к внутренней части отливки. В связи с этим микротвердость вблизи внутренней стенки формы оказывается выше. Измерения плотности показывают, что композиты с более высокой массовой долей армирующих частиц имеют большую пористость. В то же время результаты испытаний на твердость и износостойкость свидетельствуют о том, что увеличение содержания частиц TiO_2 приводит к повышению твердости и значительному снижению скорости изнашивания композиционных материалов.

Для цитирования: *Абдельазиз Х., Сабер Д.* Получение нанокомпозиционного материала с матрицей на основе алюминиевого сплава Al-7Si методом механического замешивания в стальную литейную форму с переменной толщиной стенок и исследование его характеристик // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 155–171. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-155-171.

Введение

Композиционные материалы с металлической матрицей (ММК), в особенности на основе алюминиевых сплавов, в последние годы привлекают все большее внимание автомобильной и аэрокосмической промышленности [1–3]. Среди матричных материалов для ММК наиболее тщательно изучены сплавы систем Al-Si и Al-Cu [4–7]. Автомобильная и авиационная отрасли, проявляя особый интерес к трибологическим характеристикам, все чаще используют алюминиевые сплавы, упрочненные керамическими частицами [8, 9]. В качестве упрочняющих компонентов алюмоматричных композитов широко применяются различные материалы, включая карбиды, нитриды, бориды, оксиды и интерметаллиды [10, 11]. Существуют три основных

***Адрес для переписки**
Сабер Далия, д.т.н., профессор
Кафедра материаловедения, Факультет машиностроения,
Университет Загазига,
44519, Загазиг, Египет
Тел.: 0096645355163, **e-mail:** daliasaber13@yahoo.com

подхода к изготовлению подобных композитов: твердофазные, жидкофазные и полужидкофазные методы [12–14].

Для ММК, упрочненных частицами, наиболее часто используемым является метод перемешивания расплавленного металла. Чтобы достичь однородного перемешивания, этот метод предполагает регулирование ряда производственных параметров, таких как температура расплавленного металла, время перемешивания, непрерывная и равномерная скорость частичной подачи в смесь упрочняющего компонента и скорость перемешивания [13]. Метод перемешивания расплавленного металла имеет ряд преимуществ, включая простоту, низкие затраты на обработку, легкий контроль над структурой матрицы и производство изделий, близких к окончательной форме. Однако существенной проблемой, возникающей при использовании этого метода, является низкая смачиваемость керамических частиц, требующая специальных мер для обеспечения надлежащего соединения между упрочняющими частицами и матрицей. Решение этой проблемы необходимо для достижения качественного соединения компонентов и улучшения эксплуатационных характеристик композиционных материалов [3, 9].

TiO_2 является ярким примером керамического материала, широко используемого в ММК и обладающего большим потенциалом в качестве упрочняющего компонента алюминиевых композитов. Алюминиевые сплавы, упрочненные TiO_2, характеризуются повышенной твердостью, что делает их перспективными для широкого спектра применений, включая электронные устройства, автомобильные детали и компоненты аэрокосмической техники. Улучшенные механические свойства материала обеспечивают повышенную стабильность и долговечность в сложных условиях эксплуатации, таких как высокие температуры и агрессивные среды. Подтверждено, что введение TiO_2 в алюминий эффективно улучшает механические свойства и твердость алюминиевых сплавов, расширяя возможности их применения [4, 15–17]. В исследовании Нассара и др. (Nassar et al.) оценены механические, трибологические и структурные характеристики нанокомпозита Al/TiO_2, полученного методом порошковой металлургии. Результаты показали равномерное распределение наночастиц TiO_2 в алюминиевой матрице и незначительную пористость. Установлено, что с увеличением содержания наноразмерного TiO_2 повышается предел текучести, износостойкость, предел прочности и твердость нанокомпозита [2].

Следует отметить, что TiO_2, как и большинство керамических материалов, характеризуется плохой смачиваемостью расплавленным алюминием [18–20]. Для решения этой проблемы разработаны различные методы улучшения смачивания армирующих частиц матрицей. К ним относятся добавление реакционно-активных элементов, таких как магний, термообработка керамических частиц и нанесение металлических покрытий [4, 19]. На скорость охлаждения отливки влияют такие факторы, как толщина стенок формы, температура заливки и теплоаккумулирующая способность литейной формы [21–23]. Повышение скорости охлаждения оказывает значительное влияние на структуру литого материала, приводя к измельчению зерна и изменению структуры матрицы [24, 25]. Это, в свою очередь, влияет на механические характеристики и повышает склонность к отбелу, что приводит к увеличению твердости, но может снизить прочность и ухудшить обрабатываемость отливок. Эвтектоидное превращение, происходящее после затвердевания, также оказывает влияние на структуру литого сплава.

Цель данного исследования – изучение влияния толщины стенок литейной формы в процессе затвердевания на микроструктуру и механические свойства матрицы сплава Al-7Si. Помимо этого, целью исследования является получение комплексного представления о свойствах и потенциале композиционных материалов на основе сплава Al-7Si, упрочненных частицами TiO_2, для применения в высоконагруженных конструкциях. Для достижения поставленных целей были решены следующие ***задачи***:

– исследовано влияние массовой доли упрочняющего компонента TiO_2 на плотность, твердость и износостойкость композитов;

– проведен металлографический анализ микроструктуры, формирующейся в сплаве Al-7Si после литья в стальную форму с различной толщиной стенок;

– определены микротвердость и средний размер зерна в полученных образцах сплава, отлитых в стальные формы с различной толщиной стенок.

Методы

В качестве материала матрицы композитов в данном исследовании использовался доэвтектический сплав Al-7Si. Химический состав сплава приведен в табл. 1. Упрочняющим компонентом служили частицы TiO_2 со средним размером около 80 нм. На рис. 1 представлены результаты рентгенофазового анализа (РФА) нанопорошка TiO_2, использованного в качестве упрочняющего материала. Массовая доля наночастиц TiO_2 варьировалась и составляла 0, 2, 4 и 6 %. Композиционные материалы получали с использованием специально разработанной электрической муфельной печи, что существенно облегчило процесс их получения. На рис. 2 представлена схема процесса изготовления образцов из сплава Al-7Si и нанокомпозитов. Для проведения эксперимента 400 г сплава Al-7Si загружали в тигель, который затем помещали в электрическую печь сопротивления. Для изготовления образцов, предназначенных для исследования влияния толщины стенок формы на структуру и свойства, расплав сплава Al-7Si заливали в формы из низкоуглеродистой стали с толщиной стенок 8, 12 и 29 мм.

Образцы нанокомпозитов с матрицей из сплава Al-7Si и частицами TiO_2 в качестве упрочняющего материала изготавливали с использованием отдельной стальной формы с толщиной стенки 7,5 мм, как показано на рис. 2. Частицы

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава А356, использованного в качестве матрицы в ММК

Chemical composition of A356 alloy used as the matrix in the MMCs

Химический состав элементов, %							
Al	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ni	Fe
Осн.	7,1	0,5	0,01	0,316	0,04	0,01	0,14

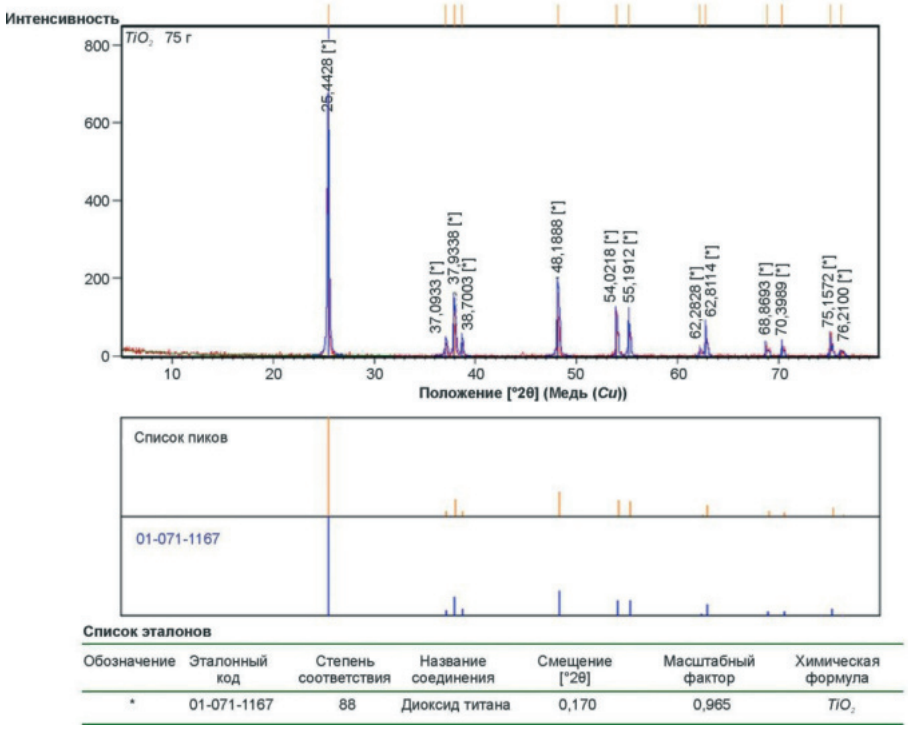


Рис. 1. Результат качественного рентгенофазового анализа нанодиоксида титана (TiO_2)

Fig. 1. Result of qualitative *XRD* analysis of nano-titanium oxide (TiO_2)

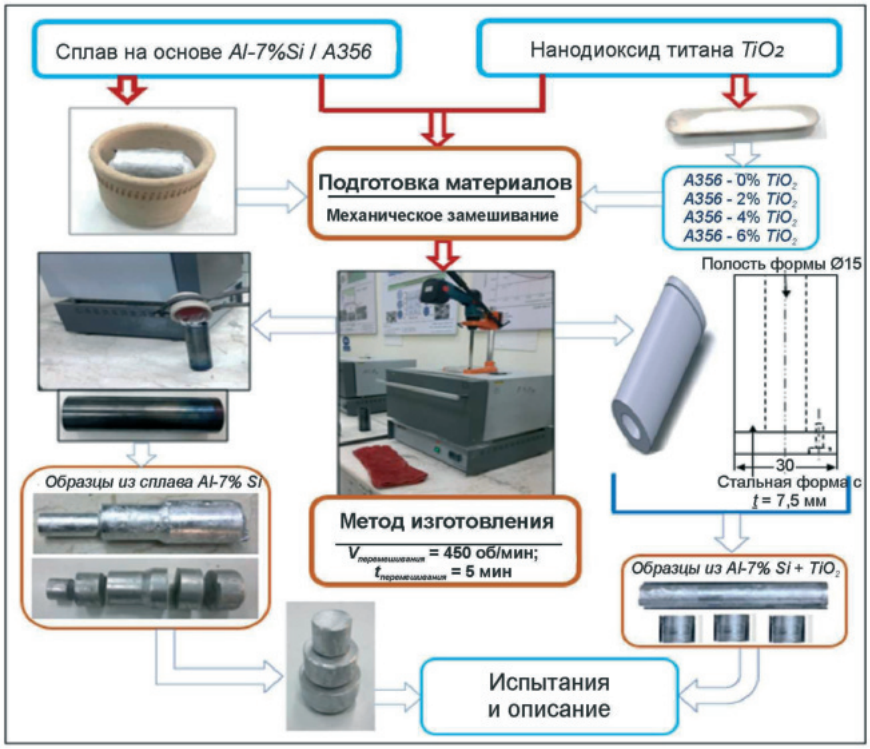


Рис. 2. Блок-схема и схематическое изображение, демонстрирующие последовательность этапов изготовления в рамках настоящего исследования

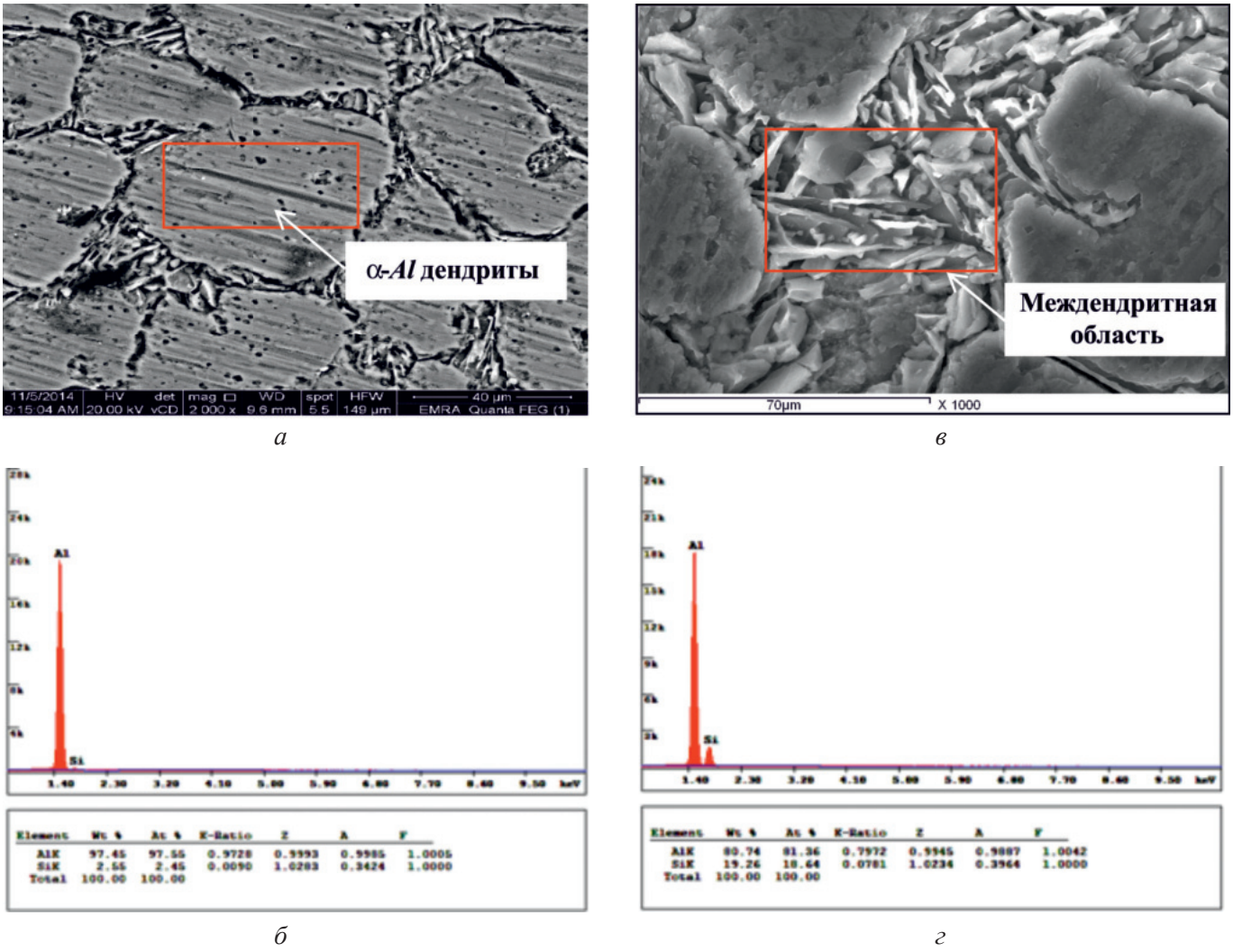
Fig. 2. Flowchart and schematic representation detailing the fabrication sequence of the present study

TiO_2 вводили в расплав с постоянной скоростью 5 г/мин. После завершения подачи частиц расплав перемешивали в течение 5 минут со скоростью 450 об/мин. Для повышения смачиваемости между упрочняющим компонентом и матрицей в расплав добавляли 1 % магния. Частицы TiO_2 перед введением в расплав подвергали предварительному нагреву при температуре 700 °C в течение 2 часов, что способствовало улучшению их смачиваемости. После изготовления литые образцы были подготовлены для дальнейшего изучения механических свойств и микроструктуры. Для подготовки металлографических шлифов образцы подвергали последовательной шлифовке и полировке, используя абразивную бумагу SiC с зернистостью от 150 до 1200. Для выявления микроструктурных составляющих образцы травили раствором, содержащим 75 мл HCl, 25 мл HNO_3, 5 мл HF и 25 мл H_2O.

Для анализа микроструктуры поверхности образцов использовалась оптическая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Определение размера зерна проводили в соответствии со стандартом ASTM E112. Микротвердость измеряли на микротвердомере VHS-1000 при нагрузке 100 г, используя шлифованные и полированные образцы. Испытания на износ проводили на машине трения по схеме «стержень – диск». Образцы подвергались нагрузкам 10 и 20 Н при скольжении по стальному диску диаметром 200 мм со скоростью 1 м/с при длине пути трения 350 м и 700 м. Объемная плотность композитов с матрицей из сплава Al-7Si, упрочненных частицами TiO_2, определяли методом Архимеда. Теоретическая плотность рассчитывалась по правилу смесей, исходя из массовой доли частиц TiO_2. Пористость композитов определяли путем сравнения экспериментальной и теоретической плотности для каждого образца. Твердость композитов оценивали методом Виккерса.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты анализа сплава Al-7Si в литом состоянии методами СЭМ и ЭДС. Из рис. 3, *а*, *в* видно, что микроструктура матричного сплава состоит из первичных ден-



а *в*

б *г*

Рис. 3. Анализ сплава с Al-Si-матрицей методами СЭМ/ЭДС:

а, *в* – микроструктура; *б*, *г* – ЭДС-анализ дендритов α-Al и междендритных областей в (*а*) и (*в*) соответственно

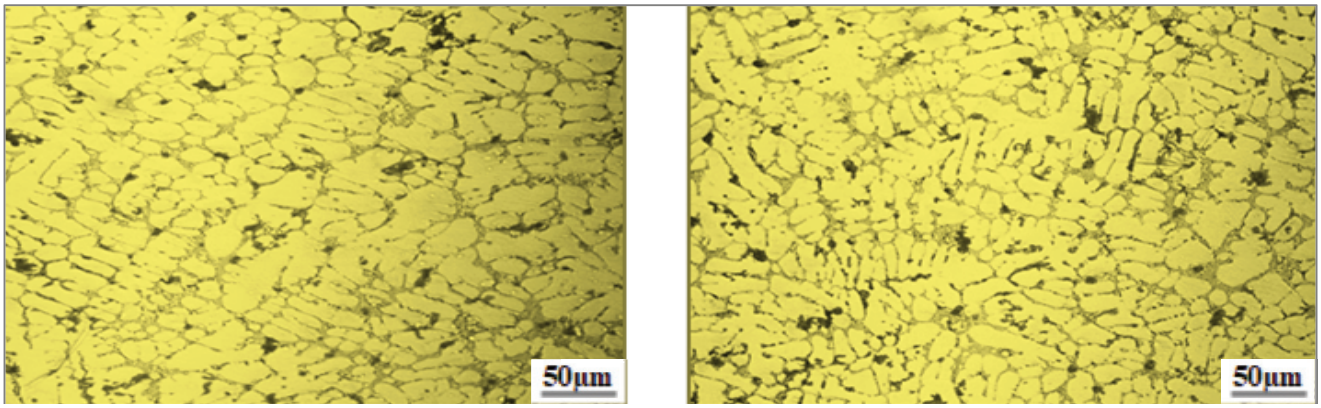
Fig. 3. SEM/EDS analysis on the *Al-Si* alloy-matrix:

а, *в* – microstructure; *б*, *г* – *EDS* of α-*Al* dendrites and inter-dendritic regions in (*а*), (*в*) respectively

дритов α-Al и междендритных областей, которые представляют собой либо усадочные поры, либо эвтектическую фазу, обогащенную кремнием. Вышеупомянутые фазы в микроструктуре отражены в спектре и массовых долях элементов в различных областях, показанных на рис. 3. Микроструктура сплава Al-7Si с различной толщиной стенок формы и скоростью охлаждения представлена на рис. 4–6. Из этих рисунков видно, что с увеличением скорости охлаждения как α-Al, так и эвтектический кремний становятся более мелкими.

Для создания различных условий охлаждения при кристаллизации использовалась ступенчатая форма с тремя различными толщинами стенок: 29, 12 и 8 мм (рис. 4–6). Установлено, что толщина стенки формы оказывает существенное влияние на микроструктуру литого сплава Al-7Si. Как видно из представленных микрофотографий, увеличение толщины стенки формы приводит к измельчению микроструктуры сплава. Это, вероятно, обусловлено тем, что с увеличением толщины стенки металлической формы возрастает скорость отвода тепла и, соответственно, скорость охлаждения. Условия охлаждения, как известно, оказывают влияние на степень измельчения зерна. Быстрая кристаллизация способствует формированию мелкозернистой структуры с равномерным распределением зерен, в то время как медленная кристаллизация приводит к образованию крупных зерен [27].

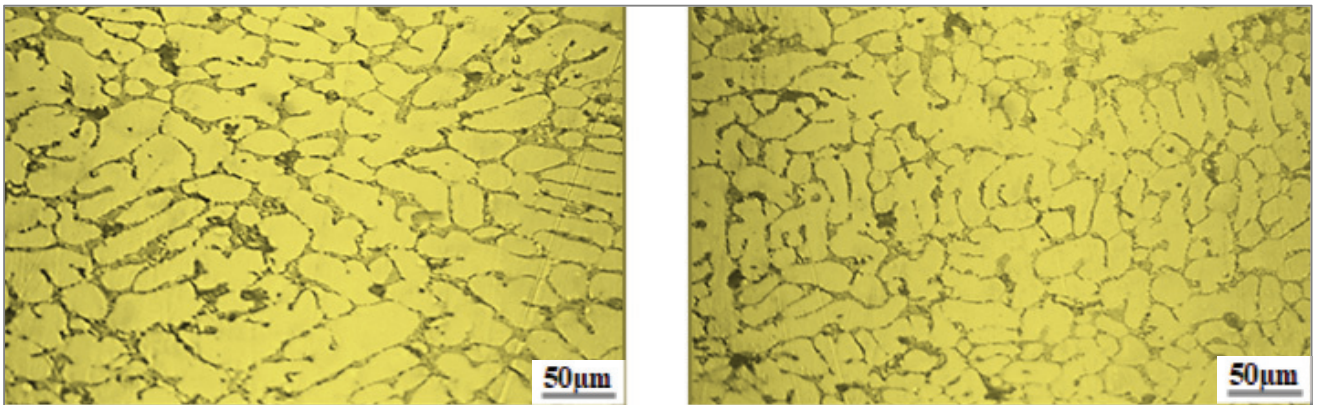
На рис. 7 показано влияние толщины стенки формы на размер зерна в литом сплаве. При увеличении толщины стенки формы



а *б*

Рис. 4. Микроструктура отливки, затвердевшей в стальной форме с толщиной стенки 29 мм, на расстоянии 9 мм от поверхности стенки формы (*а*), 4 мм от поверхности стенки формы (*б*)

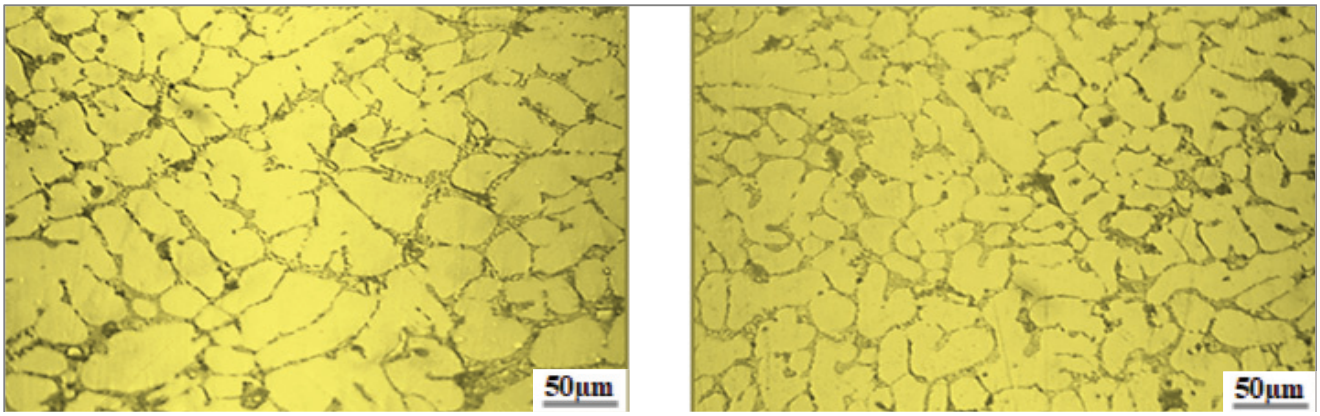
Fig. 4. The microstructure of the casting solidified in 29 mm wall thickness steel mold at; (a) distance of 9 mm from mold wall surface, (б) distance of 4 mm from mold wall surface



а *б*

Рис. 5. Микроструктура отливки, затвердевшей в стальной форме с толщиной стенки 12 мм, на расстоянии 9 мм от поверхности стенки формы (*а*), 4 мм от поверхности стенки формы (*б*)

Fig. 5. The microstructure of the casting solidified in 12 mm wall thickness steel mold at; (*а*) distance 9 mm from mold wall surface, (*б*) distance 4 mm from mold wall surface



а *б*

Рис. 6. Микроструктура отливки, затвердевшей в стальной форме с толщиной стенки 8 мм, на расстоянии 9 мм от поверхности стенки формы (*а*), 4 мм от поверхности стенки формы (*б*)

Fig. 6. The microstructure of the casting solidified in 8 mm wall thickness steel mold at; (*а*) distance 9 mm from mold wall surface, (*б*) distance 4 mm from mold wall surface

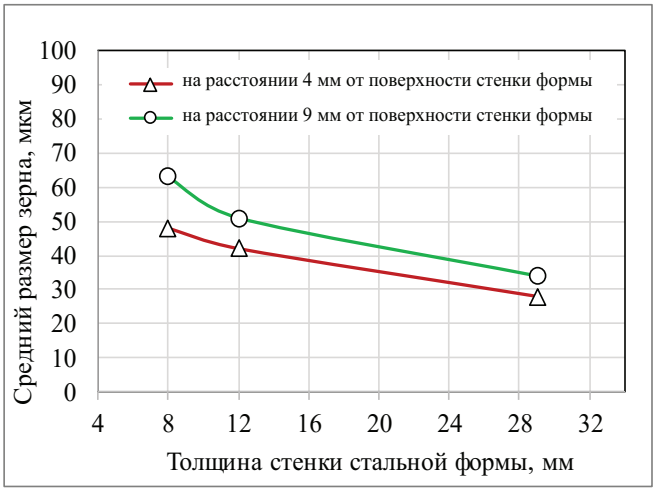


Рис. 7. Средний размер зерна отливок в зависимости от толщины стенки стальной формы

Fig. 7. Average grain size for the castings versus steel mold wall thickness

с 8 до 29 мм средний размер зерна на расстоянии 9 мм от внешней поверхности уменьшается с 63 до 34 мкм. На расстоянии 4 мм от внешней поверхности средний размер зерна уменьшается с 48 до 28 мкм. Таким образом, скорость кристаллизации оказывает определяющее влияние на степень измельчения зерна, что объясняет влияние толщины стенки формы на микроструктуру и размер зерна [28–30].

Канг и др. (Kang et al.) [31] исследовали влияние скорости охлаждения на механические свойства и микроструктуру сплавов Al-7Si. Согласно полученным данным, увеличение скорости охлаждения приводит к большему переохлаждению, что способствует уменьшению критического радиуса зародыша. В результате облегчается процесс зародышеобразования. Однако в условиях высокой скорости охлаждения мелким зернам не хватает времени, чтобы вырасти. Увеличение скорости охлаждения способствует формированию более мелкой микроструктуры. Зародышеобразование при небольшом переохлаждении протекает легче. При затвердевании поверхности формируется большое количество зародышей, которые растут впереди фронта кристаллизации. Увеличение количества центров кристаллизации приводит к формированию более мелкой структуры с большим количеством зерен. При кристаллизации отливки среднего размера фронт кристаллизации перемещается от поверхности к центру. В результате формируется однородная мелкозернистая структура по всему сечению.

Значения микротвердости возрастают с увеличением толщины стенки литейной формы из-за высокой скорости охлаждения поверхности отливки вблизи стенки. На рис. 8 показана зависимость значений микротвердости отливок от толщины стенки стальной формы. Из этого рисунка видно, что микротвердость сплава Al-7Si при толщине стенки формы 29 мм (вблизи стенки формы) составила 95 HV. На расстоянии 9 мм от внутренней стенки формы микротвердость снизилась до 89 HV. Каждое значение усреднено по четырем измерениям. Отливка с толщиной стенки 8 мм имела микротвердость 78 HV вблизи стенки формы и 74 HV вблизи центра образца. Как видно из рис. 4 и 6, увеличение среднего размера зерна может быть причиной снижения микротвердости с уменьшением толщины стенки. Из-за низкой скорости охлаждения микроструктура сплава, полученного в форме с минимальной толщиной стенки, характеризуется более крупным зерном, тогда как в отливках, полученных в формах с большей толщиной стенки, зерно мельче вследствие более интенсивного отвода тепла. Уменьшение скорости охлаждения приводит к ухудшению свойств и структуры сплава, а также к увеличению междендритного расстояния и снижению эффективности процессов измельчения и модифицирования зерна [32, 33].

На скорость кристаллизации и структуру сплава, включая размер частиц вторичных фаз,

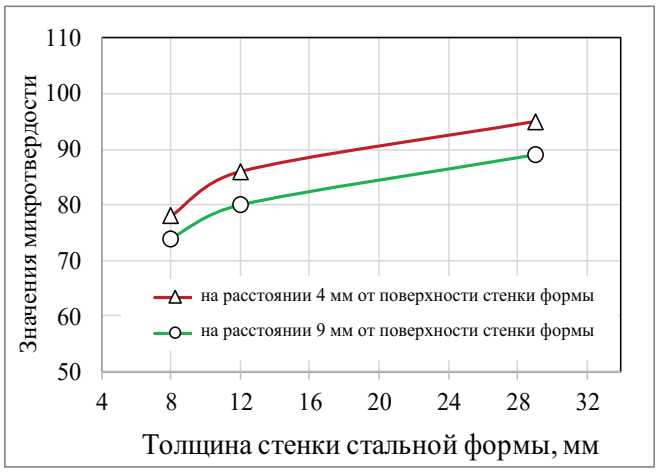


Рис. 8. Значения микротвердости отливок в зависимости от толщины стенки стальной формы

Fig. 8. Microhardness values of the castings versus steel mold wall thickness

также оказывает существенное влияние скорость охлаждения [34, 35]. Согласно данным Чен Хе и др. (Chen He et al.) [36], увеличение скорости охлаждения приводит к повышению механических свойств сплава, значительному уменьшению среднего размера зерна, междендритного расстояния второго порядка, ширины и объемной доли эвтектической фазы. При высокой скорости охлаждения происходит уменьшение размера зерен и увеличение протяженности границ зерен. Увеличение скорости охлаждения приводит к уменьшению размера частиц вторичных фаз, что оказывает влияние на механические свойства отливок [37, 38]. Конг и др. (Kong et al.) [39] исследовали влияние скорости охлаждения на механические свойства (твердость и предел прочности) алюминиевого сплава. Они отметили, что затвердевание сплава завершается в междендритном пространстве. При высокой скорости охлаждения происходит сжатие зерен α-Al, еще не сформированы дендриты и увеличивается количество границ зерен. В отличие от использования песчаных литейных форм это приводит к формированию большего количества границ зерен, уменьшению размера зерен и более равномерному распределению эвтектических фаз по границам зерен. Уменьшение количества эвтектических фаз указывает на увеличение концентрации растворенных элементов в твердой матрице, что способствует улучшению механических свойств сплава.

На рис. 9 и 10 представлены результаты измерений пористости и теоретической плотности композитов в зависимости от концентрации наночастиц TiO_2 (в масс. %). Рис. 9 демонстрирует влияние концентрации наночастиц TiO_2 на плотность композитов на основе сплава Al-7Si. Как и предсказывает правило смесей, теоретическая плотность композитов линейно возрастает с увеличением концентрации добавленных наночастиц TiO_2. Экспериментально измеренные значения плотности оказались ниже теоретических. Анализ данных о плотности позволил оценить пористость композитов. Рис. 10 показывает влияние концентрации наночастиц TiO_2 на пористость композитов на основе сплава Al-7Si. Очевидно, что с ростом концентрации наночастиц TiO_2 пористость композитов также увеличивается. При содержании 2 % наночастиц TiO_2 пористость составляла 0,56 %, а при 6 % наночастиц

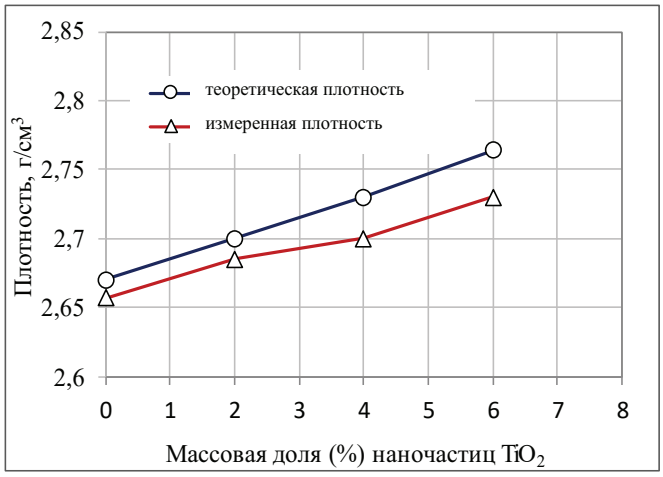


Рис. 9. Теоретическая и измеренная плотность в зависимости от массовой доли упрочняющего компонента

Fig. 9. Theoretical and measured density versus weight percent of reinforcing component

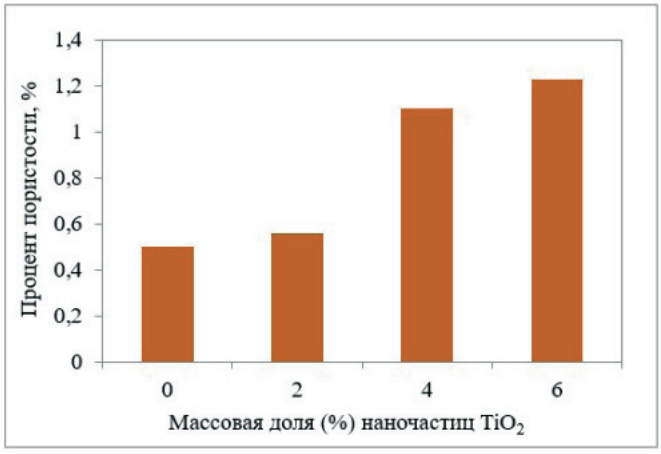


Рис. 10. Процент пористости в образцах в зависимости от массовой доли армирующего компонента

Fig. 10. Percentage of porosity in specimens versus weight percent of reinforcing component

TiO_2 она возрастала до 1,23 %. Увеличение пористости связано с образованием зародышей пор на поверхности упрочняющих частиц и их агломерацией при высокой концентрации [40–42]. М. Кок (M. Kok) [43] отмечает, что пористость является распространенным явлением при производстве ММК из-за длительной подачи частиц и увеличения площади поверхности, контактирующей с воздухом, что обусловлено малым размером частиц. Однако в данном исследовании оптимизация технологических параметров и тщательный контроль смачиваемости позволили улучшить смачиваемость частиц, усилить

связь между наночастицами TiO_2 и сплавом Al-7Si и снизить пористость композитов. Согласно данным Мэттли и др. (Mattli et al.) [44], плотность гибридных нанокомпозитов возрастает с увеличением содержания TiO_2. Поскольку плотность алюминиевой матрицы (2,7 г/см^3) ниже, чем плотность частиц упрочняющих компонентов SiC (3,21 г/см^3) и TiO_2 (4,23 г/см^3), то гибридные нанокомпозиты имеют более высокую плотность, чем базовая алюминиевая матрица.

На рис. 11 представлены результаты дюрометрических испытаний. Как видно из рисунка, твердость увеличивается с ростом концентрации наночастиц TiO_2. Добавление 6 % TiO_2 в сплав Al-7Si повысило его твердость с 69 HV до 92,5 HV. Более высокая твердость наночастиц TiO_2 по сравнению с матрицей приводит к повышению твердости композита из сплава Al-7Si. Сабер и др. (Saber et al.) [14] также отмечают, что добавление наночастиц в металлическую матрицу увеличивает твердость нанокомпозитов. Это связано с тем, что равномерно распределенные наночастицы выступают в роли упрочняющей фазы. Механизм Орована играет важную роль в упрочнении, особенно при размере частиц упрочняющей фазы менее 100 нм [45]. Согласно этому механизму прохождение дислокационной линии через частицы TiO_2 оставляет дислокационную петлю вокруг несдвигаемых частиц внутри матрицы. Это предотвращает или замедляет движение дислокаций в металлической матрице. По данным Махан и др. (Mahan et al.) [11], добавление 5 % TiO_2 увеличивает твердость по Виккерсу на 40 % по сравнению с исходным сплавом A2024. Этот эффект объясняется механизмом твердорастворного упрочнения, при котором частицы TiO_2 служат препятствиями для движения дислокаций. Аль-Джафари (Al-Jaafari) [16] также показал, что добавление 1,5 % наночастиц TiO_2 в сплавы AA6061 и AA6082 увеличивает твердость по Бринеллю (BHN) на 32 % для AA6061 и на 12,1 % для AA6082.

Результаты испытаний на износ показали, что скорость изнашивания композитов увеличивается с ростом приложенной нагрузки и снижается с увеличением содержания наночастиц TiO_2. В частности, при нагрузке 10 Н и пути скольжения 350 м (рис. 12) композит на основе сплава Al-7Si с 6 масс. % TiO_2 продемонстрировал наименьшую скорость износа (0,017 мм^3/м), тогда как сплав Al-7Si показал наибольшую скорость износа (0,028 мм^3/м). Это объясняется присутствием твердых частиц, повышающих общую твердость материала. Аналогичная тенденция наблюдалась и при нагрузке 20 Н. Рис. 13 демонстрирует, что скорость изнашивания испытанных образцов возрастала с увеличением пути скольжения. Так, сплав Al-7Si (рис. 12) имел скорость изнашивания 0,028 мм^3/м при пути скольжения 350 м, в то время как при увеличении пути до 700 м (рис. 13) скорость износа составила 0,039 мм^3/м. Такая же зависимость наблюдалась и для изготовленных композиционных материалов.

Многочисленные исследователи [4, 5, 7, 8, 15, 46] отмечают, что влияние приложенной нагрузки усиливается с увеличением процентного

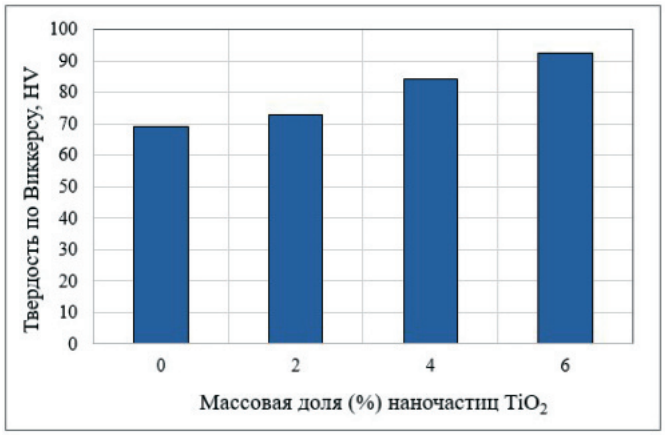


Рис. 11. Влияние содержания TiO_2 (масс. %) на твердость композитов с Al-7Si-матрицей

Fig. 11. Effect of TiO_2 wt. % on the hardness of *Al-7Si* matrix composites

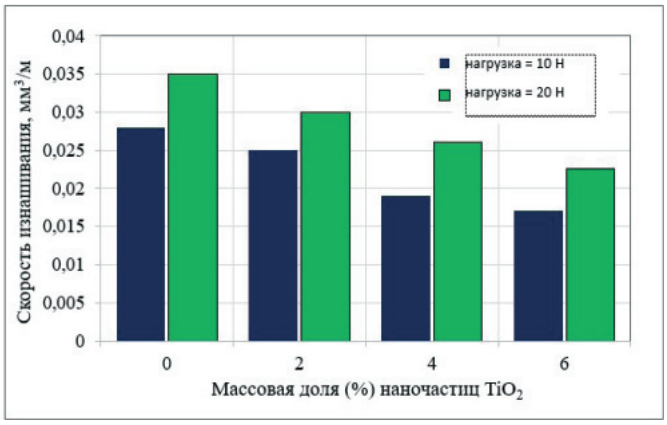


Рис. 12. Влияние содержания TiO_2 (масс. %) на скорость изнашивания композитов с Al-7Si-матрицей при расстоянии скольжения 350 м

Fig. 12. Effect of TiO_2 content (%) on the wear rate of *Al-7Si* matrix composites at a sliding distance of 350 m

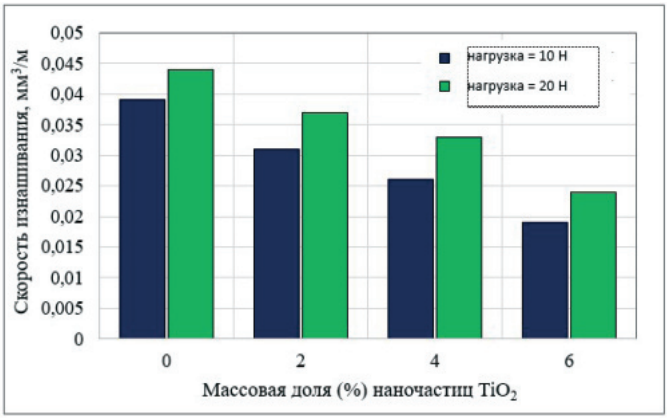


Рис. 13. Влияние содержания TiO_2 (масс. %) на скорость изнашивания композитов с Al-7Si-матрицей при расстоянии скольжения 700 м

Fig. 13. Effect of TiO_2 content (%) on the wear rate of *Al-7Si* matrix composites at a sliding distance of 700 m

содержания или размера упрочняющих частиц. Уокер и др. (Walker et al.) [46] объяснили это явление интенсивным абразивным изнашиванием обеих контактирующих поверхностей, обусловленным использованием твердых керамических частиц в качестве упрочнителя. Шаши и др. (Shashi et al.) [15] изучали влияние добавления TiO_2 на износостойкость алюминиевых сплавов AA2014 и AA2024 и обнаружили эффективный способ ее повышения. TiO_2 – это природный оксид титана, широко используемый в качестве пигмента в красках, пластмассах и косметике. При добавлении в алюминий он повышает его прочность и твердость, взаимодействуя с кристаллической решеткой металла. Внедрение частиц TiO_2 в алюминиевую матрицу приводит к формированию композиционного материала с улучшенной износостойкостью. Высокая твердость частиц TiO_2 вносит значительный вклад в повышение износостойкости алюминия.

Исследования Винайкумар и др. (Vinaykumar et al.) [8] показали, что по сравнению со сплавом Al6063 композиты на основе Al6063, содержащие 2, 4, 6 и 8 масс. % TiO_2, демонстрируют повышение износостойкости примерно на 6,25, 18,75, 37,5 и 43,75 % соответственно. Ганеш Хандури (Ganesh Khandoori) [47] с коллегами исследовали поведение алюминия, упрочненного частицами TiO_2 (5, 10 и 15 %), полученного методом механического замешивания. Результаты испытаний однозначно показали, что потеря массы образцов увеличивается с ростом нагрузки, хотя скорость изнашивания различается. При этом потеря массы композита снижается с увеличением содержания TiO_2, что свидетельствует о повышении его износостойкости.

Твердость TiO_2 по шкале Мооса составляет 5,5…6 (из 10) [48], в то время как алюминиевые сплавы имеют твердость 2,75…3. Таким образом, наночастицы TiO_2 значительно тверже матрицы Al-7Si. Добавление такого твердого материала в более мягкую алюминиевую матрицу обеспечивает большую устойчивость к износу, вызванному трением и абразией. Двиведи и др. (Dwivedi et al.) [15] обобщили, что добавление TiO_2 в алюминиевые сплавы AA2014 и AA2024 улучшает их износостойкость. Кумар и др. (Kumar et al.) [49] также подтвердили, что износостойкость и микротвердость алюминиевой матрицы повышаются с увеличением содержания TiO_2. Ахмад и др. (Ahamad et al.) [50] объяснили, что износостойкость гибридного композита ($Al\text{-}Al_2O_3\text{-}TiO_2$) возрастает с увеличением доли частиц TiO_2, что связано с их смазывающими свойствами.

Заключение

1. Толщина стенки литейной формы является одним из ключевых параметров, определяющих скорость кристаллизации отливки. Увеличение толщины стенки формы приводит к повышению скорости охлаждения, что способствует уменьшению размера зерна.

2. Микроструктура затвердевшего материала напрямую зависит от скорости охлаждения. Замедленная кристаллизация, характерная для форм с малой толщиной стенки, приводит к формированию крупнозернистой структуры. В то же время высокая скорость кристаллизации обеспечивает получение мелкозернистой структуры с улучшенными механическими свойствами.

3. Увеличение толщины стенки формы влечет за собой повышение микротвердости на поверхности отливки, что связано с интенсификацией охлаждения в пристеночной области.

4. Композиционные материалы на основе матрицы Al-7Si, армированные наночастицами TiO_2 с различной массовой долей, были успешно получены методом механического замешивания. Оптимальными технологическими параметрами процесса являются:

– температура заливки 750 °C;

– скорость перемешивания 550 об/мин;

– продолжительность перемешивания 5 минут.

5. Наличие наночастиц TiO_2 оказывает влияние на плотность и пористость композитов. Теоретическая плотность композиционного материала возрастает с увеличением массовой доли наночастиц TiO_2. Экспериментально полученные значения плотности оказались ниже теоретических, что обусловлено наличием некоторой пористости в структуре композита.

6. Введение наночастиц TiO_2 приводит к значительному повышению твердости и износостойкости композиционных материалов.

Список литературы

1. Effect of TiB_2 nanoparticle content on the microstructure and mechanical properties of TiB_2/Mg-4Al-1.5Si composites / J. Liu, X. Chen, W. Wang, Y. Zhao, N. He // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 2852. – DOI: 10.3390/ma16072852.

2. *Nassar A.E., Nassar E.E.* Properties of aluminum matrix nano composites prepared by powder metallurgy processing // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2017. – Vol. 29 (3). – P. 295–299. – DOI: 10.1016/j.jksues.2015.11.001.

3. Fabrication of Al/A206–Al_2O_3 nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology / S. Tahamtan, A. Halvaee, M. Emamy, M.S. Zabihi // Materials and Design. – 2013. – Vol. 49. – P. 347–359.

4. *Soltani M.A., Jamaati R., Toroghinejad M.R.* The influence of TiO_2 nano particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 550. – P. 367–374.

5. *Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh.* Wear behavior prediction for Cu/TiO_2 nanocomposite based on optimal regression methods // Materials Research. – 2023. – Vol. 26. – P. e20220263.

6. Effect of cooling rate on microstructure and properties of SiCP/A359 composites / Z. Jin, L. Jia, W. Wang, Y. Liu, Y. Qi, H. Zhang // Materials & Design. – 2023. – Vol. 234. – P. 112297.

7. *Megahed M., Saber D., Agwa M.A.* Modeling of wear behavior of Al-Si/Al_2O_3 metal matrix composites // Physics of Metals and Metallography. – 2019. – Vol. 120 (10). – P. 981–988.

8. *Shet V.S., Mahadev U.M.* Investigation on tribological behavior of metal matrix composites (Al6063-TiO_2) // International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD). – 2017. – Vol. 2 (8). – P. 117–148.

9. Corrosive wear of alumina particles reinforced Al–Si alloy composites / D. Saber, Kh. Abd El-Aziz, R. Abdel-Karim, A.A. Kandel // Physics of Metals and Metallography. – 2020. – Vol. 121 (2). – P. 197–203.

10. Development of Al–Mg–Si alloy performance by addition of grain refiner Al–5Ti–1B alloy / Kh. Abd El-Aziz, E.M. Ahmed, A.H. Alghtani, B.F. Felemban, H.T. Ali, M. Megahed, D. Saber // Science Progress. – 2021. – Vol. 104 (2). – DOI: 10.1177/00368504211029469.

11. The influence of TiO_2 nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminium alloy / H.M. Mahan, S.V. Konovalov, K. Osintsev, I. Panchenko // Materials and Technology. – 2023. – Vol. 57 (4). – P. 379–384.

12. Mg-based metal matrix composite in biomedical applications: a review / S. Mohanasundaram, M. Bhong, G. Vatsa, R.P. Verma, M. Srivastava, G. Kumar, K.A. Mohammed, D. Singh, L.R. Gupta // Materials Today: Proceedings. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.043.

13. *Hossein-Zadeh M., Mirzaee O., Saidi P.* Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al_2O_3 particles // Materials and Design. – 2014. – Vol. 54. – P. 245–250.

14. Characterization and performance evaluation of Cu-based/TiO_2 nano composites / D. Saber, Kh. Abd El-Aziz, B.F. Felemban, A.H. Alghtani, H.T. Ali, E.M. Ahmed, M. Megahed // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 6669.

15. Effect of nano-TiO_2 particles addition on dissimilar AA2024 and AA2014 based composite developed by friction stir process technique / S.P. Dwivedi, S. Sharma, Ch. Li, Y. Zhang, A. Kumar, R. Singh, S.M. Eldin, M. Abbas // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 1872–1881.

16. *Al-Jaafari M.A.A.* Study the effects of titanium dioxide nanoparticles reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloys composite // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1105. – P. 012062.

17. A critical review of fabrication routes and their effects on mechanical properties of AMMCs / J. Lade, K.A. Mohammed, D. Singh, R.P. Verma, P. Math, M. Saraswat, L.R. Gupta // Materials Today: Proceedings. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.041.

18. *Dewangan S., Ganguly S.K., Banchhor R.* Analysis of Al 6061–TiO_2–CNT metal matrix composites produced by stir casting process // International Journal of Engineering and Management Research. – 2018. – Vol. 8. – P. 147–152.

19. *Atta M., Megahed M., Saber D.* Using ANN and OA techniques to determine the specific wear rate effectors of A356 Al-Si/Al_2O_3 MMC // Neural Computing & Applications. – 2022. – Vol. 34. – P. 14373–14386. – DOI: 10.1007/s00521-022-07215-3.

20. Effect of La on the wettability of Al_2O_3 by molten aluminum / N. Shao, J.W. Dai, G.Y. Li, T. Hane // Materials Letters. – 2004. – Vol. 58 (14). – P. 2041–2044.

21. *Abd El-Aziz Kh.* Mechanical properties improvements of the materials used in manufacturing of food processing equipment's and containers using different techniques // Asian Journal of Applied Science and Technology. – 2023. – Vol. 7 (4). – P. 156–175.

22. *Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh.* Prediction of the corrosion rate of Al–Si alloys using optimal regression methods // Intelligent Automation & Soft Computing. – 2021. – Vol. 29 (3). – P. 757–769. – DOI: 10.32604/iasc.2021.018516.

23. *Gorny A., Tyrala E.* Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 22. – P. 300–305.

24. Influence of casting mould wall thickness on the properties and microstructure of A356 alloy reinforced with micro/nanoalumina particles / Kh. Abd El-Aziz, A.A. Abo El-Nasr, A. Elfasakhany, D. Saber, M. Helal // Arctic Journal. – 2018. – Vol. 71 (7). – P. 26–39.

25. *Ashwath P., Xavior M.A.* Compression and diametral tensile strength analysis of graphene–Al_2O_3 reinforced AA 2024 and AA 2219 hybrid nanocomposites // Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering. – Singapore: Springer, 2019. – P. 19–32.

26. Role of CNT in influencing the mechanical properties of the Mg-based composites: an overview / B. Chandrasekhar, A. Dharme, S. Kumar Sharma, R. Taluja, O.A. Jarali, R. Kalra, G. Kumar // Materials Today: Proceedings. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.385.

27. Effect of mould wall thickness on rate of solidification of centrifugal casting / Madhusudhan, S. Narendranaath, G.C. Mohankumar, P.G. Mukunda // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2 (11). – P. 6092–6096.

28. On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al–Si–Mg alloy / S. Haro-Rodríguez, R.E. Goytia-Reyes, R. Goytia, K.D. Dheerendra // Materials & Design. – 2011. – Vol. 32. – P. 1865–1871.

29. Microstructural characterization of recycled Al–Mg–Si-based alloys upon the synergistic effect of ultrasonic technology (UT) and novel refiners / Q. He, G. Zhang, S. Zhang, D. Teng, H. Jia, J. Li, R. Guan // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 31. – P. 481–495.

30. *Hamasaiid A., Dargusch M.S., Dour G.* The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 47. – P. 229–237.

31. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties in Al-Si alloys / S.B. Kang, J. Zhang, S. Wang, J. Cho, V.U. Stetsenko // Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, Yokohama, Japan. – The Japan Institute of Light Metals, 2010. – P. 675–680.

32. Effect of mould sand type and casting wall thickness on properties and microstructure of multivariate Al–7·5Si–4Cu alloy / G.L. Liu, N.C. Si, S.C. Sun, Q.F. Wu // Materials Research Innovations. – 2013. – Vol. 17, suppl. 1. – P. 246–250. – DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000224.

33. Study of the effect of hafnium and erbium content on the formation of microstructure in aluminium alloy 1590 cast into a copper chill mold / A.A. Ragazin, V.Yu. Aryshensky, S.V. Konovalov, E.V. Aryshenskii, I. Bakhtegareev // Metal Working and Material Science. – 2024. – Vol. 26 (1). – P. 99–112.

34. *Liu X., Zhao Q., Jiang Q.* Effects of cooling rate and TiC nanoparticles on the microstructure and tensile properties of an AleCu cast alloy // Materials Science & Engineering: A. – 2020. – Vol. 790. – P. 139737.

35. The control of NbB_2 particles in Al-NbB_2 master alloy and its effect on grain refinement of AZ91 magnesium alloy / W. Fan, Y. Bai, G. Zuo, H. Hao // Materials Science & Engineering: A. – 2022. – Vol. 854. – P. 143808.

36. Relationship between cooling rate, microstructure evolution, and performance improvement of an AleCu alloy prepared using different methods / C. He, W. Yu, Y. Li, Z. Wang, D. Wu, G. Xu // Materials Research Express. – 2020. – Vol. 7 (11). – P. 116501.

37. The role of cooling rate on microstructure in a sand-cast Al-Cu-Ag alloy containing high amounts of TiB2 / L. Ravkov, B. Diak, M. Gallerneault, P. Clark, G. Marzano // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2021. – Vol. 60 (2). – P. 57–65.

38. Grain refining performance of Al-B master alloys with different microstructures on Al-7Si alloy / T.M. Wang, Z.N. Chen, H.W. Fu, T.J. Li // Metals and Materials International. – 2013. – Vol. 19 (2). – P. 367–370.

39. Effect of high cooling rate on the solidification microstructure of Al-Cu/TiB_2 alloy fabricated by freeze-ablation casting / X. Kong, Y. Wang, H. Fan, J. Wu, H. Xu, H. Mao // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 25. – P. 593–607.

40. *Dewangan R., Sharma B.P., Sharma S.S.* Investigation of hardness behavior in aluminum matrix composites reinforced with coconut shell ash and red mud using Taguchi analysis // Metal Working and Material Science. – 2024. – Vol. 26 (3). – P. 179–191.

41. Effect of reinforcement concentration on the properties of hot extruded Al-Al_2O_3 composites

synthesized through microwave sintering process / M.P. Reddy, F. Ubaid, R.A. Shakoor, G. Parande, V. Manakari, A.M.A. Mohamed, M. Gupta // Materials Science & Engineering: A. – 2017. – Vol. 696. – P. 60–69.

42. Advanced metal matrix nanocomposites / M. Malaki, W. Xu, A.K. Kasar, P.L. Menezes, H. Dieringa, R.S. Varma, M. Gupta // Metals. – 2019. – Vol. 9 (3). – P. 330.

43. *Kok M.* Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 161 (3). – P. 381–387.

44. Study of microstructural and mechanical properties of Al/SiC/TiO_2 hybrid nanocomposites developed by microwave sintering / M.R. Mattli, P.R. Matli, A. Khan, R.H. Abdelatty, M. Yusuf, A.A. Ashraf, R.G. Kotalo, R.A. Shakoor // Crystals. – 2021. – Vol. 11. – P. 1078. – DOI: 10.3390/cryst11091078.

45. *Golnaz N.A., Arvin T.T., Aghajani H.* Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO_2 nanocomposite synthesized by the use of SHS method // Journal of Material Research and Technology. – 2019. – Vol. 8 (2). – P. 2216–2222.

46. *Walker J.C., Rainforth W.M., Jones H.* Lubricated sliding wear behaviour of aluminium alloy composites // Wear. – 2005. – Vol. 259. – P. 577–589.

47. *Khandoori G., Mer K.K.S., Chandraveer Singh*. Sliding behaviour of aluminium metal matrix composite reinforced with TiO_2 // International Journal of Resent Scientific Research. – 2015. – Vol. 6 (5). – P. 4197–4203.

48. Photocatalytic TiO_2-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: a review / M.-A. Gatou, A. Syrrakou, N. Lagopati, E.A. Pavlatou // Reactions. – 2024. – Vol. 5. – P. 135–194. – DOI: 10.3390/reactions5010007.

49. *Antony Vasantha Kumar C., Selwin Rajadurai J.* Influence of rutile (TiO_2) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26 (1). – P. 63–73. – DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64089-X.

50. Wear, optimization and surface analysis of Al-Al_2O_3-TiO_2 hybrid metal matrix composites / N. Ahamad, A. Mohammad, K.K. Sadasivuni, P. Gupta // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2021. – Vol. 235 (1). – P. 93–102. – DOI: 10.1177/1350650120970432.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 155–171
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-155-171

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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

Fabrication and characterization of Al-7Si alloy matrix nanocomposite by stir casting technique using multi-wall thickness steel mold

Khaled Abdelaziz [1, 2, a], ***Dalia Saber*** [1, 3, b, *]

[1] Materials Engineering Department, Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig, 44519, Egypt
[2] Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Taif University, PO Box 11099, Taif, 21944, Saudi Arabia
[3] Industrial Engineering Program, Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Taif University, PO Box 11099, Taif, 21944, Saudi Arabia

[a] https://orcid.org/0000-0001-9139-548X, kalidelaziz@gmail.com; [b] https://orcid.org/0000-0002-7349-1723, daliasaber13@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 26 October 2024
Revised: 15 November 2024
Accepted: 28 December 2024
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Metal matrix composites (MMCs)
Mold wall thickness
TiO2 nanoparticles
Mechanical properties

ABSTRACT

Introduction. The *Al-7Si* is considered one of the key aluminum alloys due to its favorable combinations of casting and mechanical properties. Metal matrix composites (MMCs) reinforced with ceramic particles are widely used in high-tech industries such as military, automotive, aerospace, and electrical engineering. ***The purposes of this study*** are threefold: (1) to investigate the feasibility of producing composite materials based on the *Al-7Si* alloy reinforced with varying amounts of TiO_2 nanoparticles using a stir casting technique; (2) to investigate the effect of mold wall thickness on the microstructure and mechanical properties of the *Al-7Si* alloy during solidification; and (3) to analyze the influence of the reinforcing component content on the mechanical properties and wear resistance of the resulting composite materials. **Methodology.** Metal matrix composite materials based on the *Al-7Si* alloy, containing 0, 2, 4, and 6 wt. % TiO_2 nanoparticles, were fabricated using a stir casting technique. Cylindrical specimens with a diameter of 15 mm and a length of 18 mm were prepared for metallographic and mechanical testing. **Results and discussion.** It is found that the solidification rate increases with increasing mold wall thickness. This leads to an increase in the cooling rate and, consequently, to the formation of a finer-grained structure. The microstructure of the casting demonstrates a change in grain size from fine to coarse when transitioning from the outer surface (adjacent to the inner mold wall) to the inner part of the casting. As a result, the microhardness near the inner mold wall is higher. Density measurements indicate that composites with a higher amount of reinforcing particles exhibit greater porosity. Furthermore, the results of hardness and wear tests reveal that an increase in the TiO_2 particle content leads to increased hardness and a significant reduction in the wear rate of the composite materials.

For citation: Abdelaziz K., Saber D. Fabrication and characterization of Al-7Si alloy matrix nanocomposite by stir casting technique using multi-wall thickness steel mold. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 155–171. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-155-171. (In Russian).

References

1. Liu J., Chen X., Wang W., Zhao Y., He N. Effect of TiB_2 nanoparticle content on the microstructure and mechanical properties of TiB_2/Mg-4Al-1.5Si composites. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 2852. DOI: 10.3390/ma16072852.

2. Nassar A.E., Nassar E.E. Properties of aluminum matrix nano composites prepared by powder metallurgy processing. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2017, vol. 29 (3), pp. 295–299. DOI: 10.1016/j.jksues.2015.11.001.

3. Tahamtan S., Halvaee A., Emamy M., Zabihi M.S. Fabrication of Al/A206–Al_2O_3 nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology. *Materials and Design*, 2013, vol. 49, pp. 347–359.

*** Corresponding author**
Saber Dalia, D.Sc. (Engineering), Professor
Materials Engineering Department, Faculty of Engineering,
Zagazig University,
44519, Zagazig, Egypt
Tel.: 0096645355163, **e-mail:** daliasaber13@yahoo.com

4. Soltani M.A., Jamaati R., Toroghinejad M.R. The influence of TiO2 nano particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 550, pp. 367–374.

5. Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh. Wear behavior prediction for Cu/TiO_2 nanocomposite based on optimal regression methods. *Materials Research*, 2023, vol. 26, p. e20220263.

6. Jin Z., Jia L., Wang W., Liu Y., Qi Y., Zhang H. Effect of cooling rate on microstructure and properties of SiCP/A359 composites. *Materials & Design*, 2023, vol. 234, p. 112297.

7. Megahed M., Saber D., Agwa M.A. Modeling of wear behavior of Al-Si/Al_2O_3 metal matrix composites. *Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120 (10), pp. 981–988.

8. Shet V.S., Mahadev U.M. Investigation on tribological behavior of metal matrix composites (Al6063-TiO_2). *International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD)*, 2017, vol. 2 (8), pp. 117–148.

9. Saber D., Abd El-Aziz Kh., Abdel-Karim R., Kandel A.A. Corrosive wear of alumina particles reinforced Al–Si alloy composites. *Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121 (2), pp. 197–203.

10. Abd El-Aziz Kh., Ahmed E.M., Alghtani A.H., Felemban B.F., Ali H.T., Megahed M., Saber D. Development of Al–Mg–Si alloy performance by addition of grain refiner Al–5Ti–1B alloy. *Science Progress*, 2021, vol. 104 (2). DOI: 10.1177/00368504211029469.

11. Mahan H.M., Konovalov S.V., Osintsev K., Panchenko I. The influence of TiO_2 nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminium alloy. *Materials and Technology*, 2023, vol. 57 (4), pp. 379–384.

12. Mohanasundaram S., Bhong M., Vatsa G., Verma R.P., Srivastava M., Kumar G., Mohammed K.A., Singh D., Gupta L.R. Mg-based metal matrix composite in biomedical applications: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.043.

13. Hossein-Zadeh M., Mirzaee O., Saidi P. Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al_2O_3 particles. *Materials and Design*, 2014, vol. 54, pp. 245–250.

14. Saber D., El-Azi K.A., Felemban B.F., Alghtani A.H., Ali H.T., Ahmed E.M., Megahed M. Characterization and performance evaluation of Cu-based/TiO_2 nano composites. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12 (1), p. 6669.

15. Dwivedi S.P., Sharma S., Li Ch., Zhang Y., Kumar A., Singh R., Eldin S.M., Abbas M. Effect of nano-TiO_2 particles addition on dissimilar AA2024 and AA2014 based composite developed by friction stir process technique. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, pp. 1872–1881.

16. Al-Jaafari M.A.A. Study the effects of titanium dioxide nanoparticles reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloys composite. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1105, p. 012062.

17. Lade J., Mohammed K.A., Singh D., Verma R.P., Math P., Saraswat M., Gupta L.R. A critical review of fabrication routes and their effects on mechanical properties of AMMCs. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.041.

18. Dewangan S., Ganguly S.K., Banchhor R. Analysis of Al 6061–TiO_2–CNT metal matrix composites produced by stir casting process. *International Journal of Engineering and Management Research*, 2018, vol. 8, pp. 147–152.

19. Atta M., Megahed M., Saber D. Using ANN and OA techniques to determine the specific wear rate effectors of A356 Al-Si/Al_2O_3 MMC. *Neural Computing & Applications*, 2022, vol. 34, pp. 14373–14386. DOI: 10.1007/s00521-022-07215-3.

20. Shao N., Dai J.W., Li G.Y., Hane T. Effect of La on the wettability of Al_2O_3 by molten aluminum. *Materials Letters*, 2004, vol. 58 (14), pp. 2041–2044.

21. Abd El-Aziz Kh. Mechanical properties improvements of the materials used in manufacturing of food processing equipment's and containers using different techniques. *Asian Journal of Applied Science and Technology*, 2023, vol. 7 (4), pp. 156–175.

22. Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh. Prediction of the corrosion rate of Al–Si alloys using optimal regression methods. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2021, vol. 29 (3), pp. 757–769. DOI: 10.32604/iasc.2021.018516.

23. Gorny A., Tyrala E. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, vol. 22, pp. 300–305.

24. Abd El-Aziz Kh., Abo El-Nasr A.A, Elfasakhany A., Saber D., Helal M. Influence of casting mould wall thickness on the properties and microstructure of A356 alloy reinforced with micro/nanoalumina particles. *Arctic Journal*, 2018, vol. 71 (7), pp. 26–39.

25. Ashwath P., Xavior M.A. Compression and diametral tensile strength analysis of graphene–Al_2O_3 reinforced AA 2024 and AA 2219 hybrid nanocomposites. *Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering*. Singapore, Springer, 2019, pp. 19–32.

26. Chandrasekhar B., Dharme A., Kumar Sharma S., Taluja R., Jarali O.A., Kalra R., Kumar G. Role of CNT in influencing the mechanical properties of the Mg-based composites: an overview. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.385.

27. Madhusudhan, Narendranaath S., Mohankumar G.C., Mukunda P.G. Effect of mould wall thickness on rate of solidification of centrifugal casting. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2 (11), pp. 6092–6096.

28. Haro-Rodríguez S., Goytia-Reyes R.E., Goytia R., Dheerendra K.D. On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al–Si–Mg alloy. *Materials & Design*, 2011, vol. 32, pp. 1865–1871.

29. He Q., Zhang G., Zhang S., Teng D., Jia H., Li J., Guan R. Microstructural characterization of recycled Al–Mg–Si-based alloys upon the synergistic effect of ultrasonic technology (UT) and novel refiners. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 31, pp. 481–495.

30. Hamasaiid A., Dargusch M.S., Dour G. The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 47, pp. 229–237.

31. Kang S.B., Zhang J., Wang S., Cho J., Stetsenko V.U. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties in Al-Si alloys. *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*, Yokohama, Japan. The Japan Institute of Light Metals Cooling, 2010, pp. 675–680.

32. Liu G.L., Si N.C., Sun S.C., Wu Q.F. Effect of mould sand type and casting wall thickness on properties and microstructure of multivariate Al–7·5Si–4Cu alloy. *Materials Research Innovations*, 2013, vol. 17, suppl. 1, pp. 246–250. DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000224.

33. Ragazin A.A., Aryshensky V.Yu., Konovalov S.V., Aryshenskii E.V., Bakhtegareev I. Study of the effect of hafnium and erbium content on the formation of microstructure in aluminium alloy 1590 cast into a copper chill mold. *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26 (1), pp. 99–112.

34. Liu X., Zhao Q., Jiang Q. Effects of cooling rate and TiC nanoparticles on the microstructure and tensile properties of an AleCu cast alloy. *Materials Science & Engineering: A*, 2020, vol. 790, p. 139737.

35. Fan W., Bai Y., Zuo G., Hao H. The control of NbB_2 particles in Al- NbB_2 master alloy and its effect on grain refinement of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science & Engineering: A*, 2022, vol. 854, p. 143808.

36. He C., Yu W., Li Y., Wang Z., Wu D., Xu G. Relationship between cooling rate, microstructure evolution, and performance improvement of an AleCu alloy prepared using different methods. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7 (11), p. 116501.

37. Ravkov L., Diak B., Gallerneault M., Clark P., Marzano G. The role of cooling rate on microstructure in a sand-cast Al-Cu-Ag alloy containing high amounts of TiB2. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2021, vol. 60 (2), pp. 57–65.

38. Wang T.M., Chen Z.N., Fu H.W., Li T.J. Grain refining performance of Al-B master alloys with different microstructures on Al-7Si alloy. *Metals and Materials International*, 2013, vol. 19 (2), pp. 367–70.

39. Kong X., Wang Y., Fan H., Wu J., Xu H., Mao H. Effect of high cooling rate on the solidification microstructure of Al-Cu/TiB_2 alloy fabricated by freeze-ablation casting. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 25, pp. 593–607.

40. Dewangan R., Sharma B.P., Sharma S.S. Investigation of hardness behavior in aluminum matrix composites reinforced with coconut shell ash and red mud using Taguchi analysis. *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26 (3), pp. 179–191.

41. Reddy M.P., Ubaid F., Shakoor R.A., Parande G., Manakari V., Mohamed A.M.A., Gupta M. Effect of reinforcement concentration on the properties of hot extruded Al-Al_2O_3 composites synthesized through microwave sintering process. *Materials Science & Engineering: A*, 2017, vol. 696, pp. 60–69.

42. Malaki M., Xu W., Kasar A.K., Menezes P.L., Dieringa H., Varma R.S., Gupta M. Advanced metal matrix nanocomposites. *Metals*, 2019, vol. 9 (3), p. 330.

43. Kok M. Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 161 (3), pp. 381–387.

44. Mattli M.R., Matli P.R., Khan A., Abdelatty R.H., Yusuf M., Ashraf A.A., Kotalo R.G., Shakoor R.A. Study of microstructural and mechanical properties of Al/SiC/TiO_2 hybrid nanocomposites developed by microwave sintering. *Crystals*, 2021, vol. 11, p. 1078. DOI: 10.3390/cryst11091078.

45. Golnaz N.A., Arvin T.T., Aghajani H. Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO_2 nanocomposite synthesized by the use of SHS method. *Journal of Material Research and Technology*, 2019, vol. 8 (2), pp. 2216–2222.

46. Walker J.C., Rainforth W.M., Jones H. Lubricated sliding wear behaviour of aluminium alloy composites. *Wear*, 2005, vol. 259, pp. 577–589.

47. Khandoori G., Mer K.K.S., Chandraveer Singh. Sliding behaviour of aluminium metal matrix composite reinforced with TiO_2. *International Journal of Resent Scientific Research*, 2015, vol. 6 (5), pp. 4197–4203.

48. Gatou M.-A., Syrrakou A., Lagopati N., Pavlatou E.A. Photocatalytic TiO_2-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: a review. *Reactions*, 2024, vol. 5, pp. 135–194. DOI: 10.3390/reactions5010007.

49. Antony Vasantha Kumar C., Selwin Rajadurai J. Influence of rutile (TiO_2) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, vol. 26 (1), pp. 63–73. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64089-X.

50. Ahamad N., Mohammad A., Sadasivuni K.K., Gupta P. Wear, optimization and surface analysis of Al-Al_2O_3-TiO_2 hybrid metal matrix composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235 (1), pp. 93–102. DOI: 10.1177/1350650120970432.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

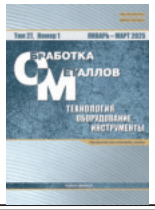
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 172–191
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-172-191

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Разработка и исследование композиционных материалов из акрилата с ПЭЭК для изготовления имплантатов тазобедренного сустава методом аддитивного производства (DLP 3D-печать)

Йогирадж Дама [1, a], *Бхагван Джоги* [1, b, *], *Раджу Паваде* [1, c], *Шибам Пал* [2, d], *Йогеш Гаиквад* [2, e]

[1] Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере, Райгад, Махараштра, 402103, Индия
[2] Национальная химическая лаборатория CSIR, Пашан, Пуна, Махараштра, 411008, Индия

[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/0000-0002-3681-5039, shibampal123456@gmail.com;
[e] https://orcid.org/0009-0003-3211-0861, ym.gaikwad@ncl.res.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678.8

История статьи:
Поступила: 26 ноября 2024
Рецензирование: 14 декабря 2024
Принята к печати: 06 января 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
3D-печать
Биоматериалы
FDM
Имплантат
Направление печати
PLA
Износостойкость

АННОТАЦИЯ

Введение. Замена тазобедренного сустава является наиболее сложной и критически важной ортопедической операцией по сравнению с заменой коленного и плечевого суставов. За последние несколько десятилетий произошло значительное развитие технологии замены тазобедренного сустава, а различные биоматериалы были существенно усовершенствованы. Все больше операций по замене тазобедренного сустава проходят успешно, что помогает людям восстановить нормальную повседневную активность и трудовую деятельность, приближенную к состоянию до перелома. Однако необходимость повторной операции уже по замене имплантата у активных пациентов по-прежнему наблюдаются через несколько лет после первичной операции. Это подчеркивает необходимость разработки долговечных биоматериалов и индивидуализированных имплантатов тазобедренного сустава для снижения износа имплантата и риска вывиха. В данном исследовании разработан новый композиционный биоматериал на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) в акрилате с различным массовым содержанием ПЭЭК (0, 5 и 10 %) в акрилатном базовом материале. Проведены испытания для определения его свойств, биосовместимости и возможности 3D-печати. На основе разработанного материала методом 3D-печати изготовлены стержни (в соответствии со стандартом ASTM) для последующего изучения скорости изнашивания. Возможность использования разработанных композиционных материалов для изготовления эндопротезов также была тщательно исследована. **Цель работы.** Целью данного исследования является разработка и изучение нового композитного биоматериала на основе ПЭЭК в акрилате с различным массовым содержанием ПЭЭК (0, 5 и 10 %) в акрилатном базовом материале. В рамках исследования проведена оценка свойств, биосовместимости и возможности 3D-печати материала. На 3D-принтере с использованием технологии печати цифровым проектором (DLP) при комнатной температуре были напечатаны стержни, соответствующие стандарту ASTM. Проведено экспериментальное исследование износостойкости в условиях сухого трения скольжения полученных образцов для определения влияния массовой доли ПЭЭК на скорость изнашивания и прочность разработанного материала при трении о диск из стали SS 316. Для анализа структуры поверхности и распределения элементов в материале использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и энергодисперсионную спектроскопию (ЭДС). **Методы исследования.** Для 3D-печати стержней, соответствующих стандарту ASTM, и ацетабулярного вкладыша с различным массовым содержанием ПЭЭК в акрилате использовали технологию 3D-печати, основанную на спекании полимера цифровым светодиодным проектором (DLP). Испытания на сухое трение скольжения проводили с использованием машины трения, реализующей схему «стержень – диск». В ходе испытаний варьировали скорость вращения диска и нормальную нагрузку на стержень. Исследования были спланированы для определения влияния входных параметров на скорость изнашивания. Проведено 9 экспериментов на дистанции скольжения 4 км для каждого варианта массового содержания ПЭЭК. Диапазон нагрузки составлял 20…100 Н, а скорость скольжения варьировали от 450 до 750 об/мин. Структура поверхности и распределение элементов были проанализированы методами энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). **Результаты и обсуждение.** Данное исследование демонстрирует преимущества варьирования массовой доли ПЭЭК в акрилате для биоматериалов, изготовленных методом DLP. Анализ результатов СЭМ, ЭДС и испытаний на изнашивание показал, что композит с 10 масс. % ПЭЭК в акрилате обладает превосходной микроструктурной целостностью, однородностью элементов и значительно более высокой износостойкостью. Композиционный материал из акрилата с 10 масс. % ПЭЭК, полученный с помощью DLP 3D-печати, пригоден для биомедицинских имплантатов и использования в здравоохранении.

Для цитирования: Разработка и исследование композиционных материалов из акрилата с ПЭЭК для изготовления имплантатов тазобедренного сустава методом аддитивного производства (DLP 3D-печать) / Й.Б. Дама, Б.Ф. Джоги, Р. Паваде, Ш. Пал, Й.М. Гаиквад // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 172–191. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-172-191.

Введение

Имплантаты тазобедренного сустава играют ключевую роль в современной ортопедической хирургии и широко применяются для лечения заболеваний, таких как остеоартрит,

***Адрес для переписки**
Джоги Бхагван Фатру, профессор
Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара,
Лонере, Райгад,
402103, Махараштра, Индия
Тел.: +91 942-116-6370, **e-mail:** bfjogi@dbatu.ac.in

ревматоидный артрит, переломы шейки бедра и врожденные деформации [1]. Эти имплантаты предназначены для замены поврежденного тазобедренного сустава, восстановления двигательной функции и снижения болевого синдрома [2]. В связи с ответственной функцией поддержания массы тела и обеспечения движений материалы для тазобедренных имплантатов должны обладать превосходными механическими свойствами, биосовместимостью и долговечностью [3]. Аддитивные технологии (АТ), или 3D-печать, коренным образом изменили биомедицинскую инженерию, открыв возможности для создания сложных геометрических форм и персонализированных имплантатов, адаптированных к индивидуальной анатомии пациента [4]. В частности, методы аддитивного производства позволяют использовать пористые титановые сплавы, что способствует улучшению остеоинтеграции и минимизации разницы в жесткости между имплантатом и костью, обеспечивая тем самым благоприятные долгосрочные результаты для пациентов [5]. В настоящем исследовании проводится оценка механических свойств, биосовместимости и общей эффективности имплантатов тазобедренных суставов, изготовленных как из традиционных материалов, так и с применением аддитивных технологий [6]. Целью работы является изучение потенциала аддитивного производства для улучшения результатов лечения пациентов посредством преодоления ограничений, присущих классическим имплантатам, таких как эффект «экранирования» от нагрузки и недостаточная интеграция с костной тканью [7].

Среди всего спектра полимерных биоматериалов полиэфирэфиркетон (ПЭЭК, PEEK) выделяется своей пригодностью для 3D-печати, превосходя другие материалы, используемые в ортопедической имплантологии [8]. ПЭЭК (PEEK) находит применение в традиционных производственных процессах при создании различных биомедицинских имплантатов [9]. Он характеризуется высокой прочностью и модулем Юнга, близким к соответствующему показателю кости человека, что позволяет минимизировать эффект «экранирования» от нагрузки и повысить стабильность имплантата. Благодаря этим свойствам ПЭЭК (PEEK) является перспективным материалом для изготовления несущих элементов, таких как чашки тазобедренного сустава [10]. ПЭЭК (PEEK) обладает высокой термической стабильностью и температурой плавления около 343 °C. Это позволяет ему выдерживать процессы стерилизации, необходимые для медицинских имплантатов, без деградации, что обеспечивает сохранение свойств на протяжении всего срока службы в организме [11]. Кроме того, ПЭЭК (PEEK) демонстрирует исключительную химическую стойкость к широкому спектру веществ, включая растворители, кислоты и основания, что гарантирует его долговечность и стабильность в условиях организма без возникновения нежелательных реакций [12]. Биосовместимость ПЭЭК (PEEK) как надежного материала для биомедицинских применений подтверждена многочисленными исследованиями [13, 14].

Для адекватной оценки применимости ПЭЭК (PEEK) в несущих ортопедических имплантатах ключевое значение имеют механические испытания и исследования износостойкости. В частности, Редди и др. (Reddy et al.) [15] исследовали механические свойства напечатанных образцов ПЭЭК (PEEK), предназначенных для зубных имплантатов, и установили, что образцы, изготовленные при угле растра (45°/−45°), демонстрируют улучшенные показатели прочности на растяжение, сжатие и изгиб. Это свидетельствует о перспективности ПЭЭК (PEEK) как альтернативы титану и диоксиду циркония в стоматологии. Чжан и др. (Zhang et al.) [16] в своих исследованиях композитного имплантата ПЭЭК-Ti_6Al_4V, в рамках проведения механических испытаний, оценивали прочность на сжатие и износостойкость в соответствии со стандартными протоколами ASTM. Ду и др. (Du et al.) [17] изучали механические характеристики каркасов из композиционного материала ПЭЭК-SiN.

Анализ ПЭЭК-имплантатов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) позволяет получить ценные сведения о морфологии поверхности и микроструктурных особенностях материала. Так, Лим и др. (Lim et al.) в 2019 году [18] использовали СЭМ для оценки пористости различных напечатанных конструкций из ПЭЭК и титана. Результаты показали, что размер пор около 1,2 мм наиболее соответствует структуре губчатой кости человека. Доказано, что данный оптимальный размер пор улучшает

остеоинтеграцию, поскольку СЭМ-изображения демонстрируют, что шероховатая текстура поверхности пористых структур способствует увеличению силы отрыва и в целом повышению способности к костной интеграции [19]. С другой стороны, СЭМ-анализ, проведенный Карпентером и др. (Carpenter et al.) в 2018 году [20], выявил существенные различия между пористыми ПЭЭК- и титановыми имплантатами. В 2020 году Вирпе и др. (Virpe et al.) [21] провели анализ полимерных композитов, продемонстрировавший успешное внедрение углеродных наполнителей в матрицу PLA с использованием FDM 3D-печати.

В то же время взаимосвязь между микроструктурными характеристиками, определенными методом СЭМ, и их влиянием на механизмы изнашивания при испытаниях по схеме «стержень – диск» остается недостаточно изученной [22, 23]. Отмечается, что не все полимерные биоматериалы, такие как СВМПЭ (UHMWPE), ПЭВП (HDPE) и ПЭ (PE), легко поддаются 3D-печати, что обусловливает необходимость применения альтернативных полимеров, включая ПЭЭК (PEEK), ПЛА (PLA), а также композитных полимерных материалов, которые были бы пригодны для 3D-печати и соответствовали требованиям, предъявляемым к имплантатам [24]. Таким образом, исследование характеристик скорости изнашивания имплантатов тазобедренного сустава является важной задачей, в связи с чем проводятся дополнительные исследования параметров изнашивания с использованием разнообразных полимерных биоматериалов, композитов и биоматериалов с покрытиями [25]. Различные методы испытаний, применяемые для оценки износостойкости и механических свойств полимерных материалов, могут быть успешно использованы и в области биоматериалов [27, 28].

В рамках данной работы предпринята попытка исследования ПЭЭК (PEEK) в составе биоматериала на основе акрилатного полимера для разработки тазобедренных имплантатов, которые возможно изготавливать посредством 3D-печати при комнатной температуре [26]. ***Задачи исследования*** включают в себя изучение влияния степени армирования на микроструктурную целостность, распределение элементов и характеристики износа, что внесет вклад в создание материалов на основе ПЭЭК (PEEK) для ортопедических целей. Кроме того, планируется проведение триботехнических испытаний напечатанных стержней, соответствующих стандарту ASTM, по схеме «штифт – диск» для оценки характеристик скорости изнашивания.

Для проведения исследований было использовано оборудование для 3D-печати цифровым проектором (DLP), предоставленное Национальной химической лабораторией (NCL) в Пуне, штат Махараштра, Индия, а также оборудование для испытаний на изнашивание, расположенное на кафедре машиностроения VIIT в том же городе.

Методы

Подготовка материалов

Составы композиционных материалов включали 0, 5 и 10 % ПЭЭК (PEEK) (по массе) в акрилатном основном материале. Композитные смолы готовили путем смешивания ПЭЭК-акрилатной смолы с различным содержанием ПЭЭК (PEEK) (5 и 10 % по массе). На рис. 1 представлена схема процесса приготовления смолы для 3D-печати и последующего изготовления физических объектов методом 3D-печати. Предварительная подготовка смолы заключалась в растворении реакционноспособных разбавителей, таких как трицикло[5.2.1.0^{2-6}]декандиметанол диакрилат (TCDDA), этоксилированный бисфенол А диметакрилат (BPAEDMA), и фотоинициаторов в акрилатном связующем.

Полученная смоляная смесь загружалась в DLP 3D-принтер, где процесс печати инициировался посредством послойного отверждения материала.

При 3D-печати цифровым проектором (DLP), как показано на рис. 2, *а*, этот проектор используется для формирования изображения целого слоя печатаемого объекта на поверхности ванны с жидким фотополимером. Под воздействием проецируемого изображения происходит селективное затвердевание фотополимерной смолы, соответствующее форме слоя. После отверждения каждого слоя платформа построения поднимается, отделяя сформированный слой от ванны со смолой, и формируется объемная 3D-модель объекта. Для очистки полученного изделия и окончательной полимеризации смолы исполь-

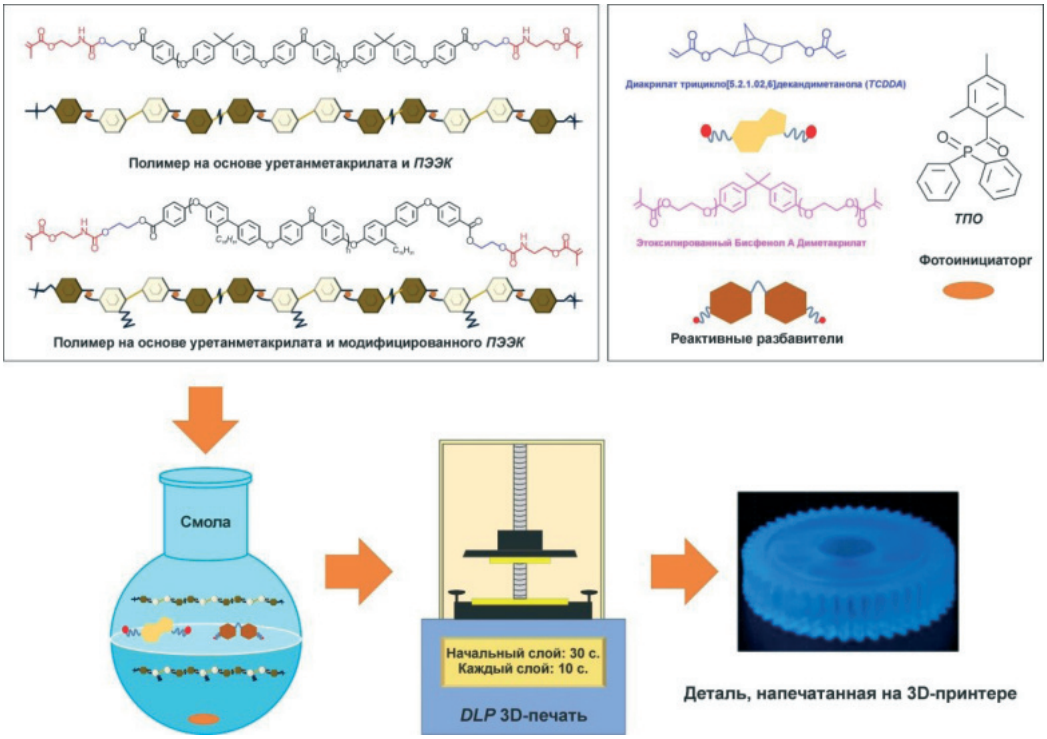


Рис. 1. Методика подготовки материалов, использованная в исследовании [26]

Fig. 1. Material preparation methodology used in the study [26]

а *б*

Рис. 2. Метод DLP 3D-печати:

а – DLP 3D-принтер; *б* – машина для промывки и отверждения

Fig. 2. DLP 3D printing method:

a – *DLP* 3DPrint; *б* – wash and cure machine

зуется машина для промывки и доотверждения (рис. 2, *б*). Композитный биоматериал на основе ПЭЭК (PEEK) и акрилата применялся для 3D-печати стержней, соответствующих стандарту ASTM, и фрагмента эндопротеза тазобедренного сустава.

Начальное время отверждения слоя составляло 30 секунд, а затем 10 секунд для каждого последующего слоя. Стержни, соответствующие стандарту ASTM (диаметр 10 мм и высота 15 мм), были напечатаны в контролируемых условиях для обеспечения однородного размера и формы.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Для повышения электропроводности неметаллических образцов проводили напыление тонкого слоя золота (Au). Слой золота толщиной около 10 нм наносили с помощью устройства для ионного напыления. Этот этап необходим для минимизации эффектов заряжения, возникающих при проведении СЭМ-анализа, которые могут приводить к искажениям изображения и ухудшению разрешения. Выбор золота обусловлен его высокой электропроводностью и минимальным взаимодействием с электронным пучком. Принцип работы СЭМ-установки Zeus представлен на рис. 3. СЭМ-анализ осуществляли с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeus с полевой эмиссией, который характеризуется высоким разрешением и универсальностью применения в материаловедении. Рабочее ускоряющее напряжение микроскопа составляло 20 кВ. Выбранное значение напряжения является оптимальным компромиссом между необходимостью получения изображений с высоким разрешением и обеспечением достаточной глубины проникновения электронного пучка в материал образца. Применение более низких напряжений может оказаться недостаточным для проникновения, особенно в случае композиционных материалов с неоднородным распределением плотности, что будет ограничивать глубину анализа. Схема экспериментальной установки, использованной для проведения СЭМ-анализа, представлена на рис. 3.

Изображения образцов получали при различных увеличениях: 500×, 1000×, 2000× и 5000×. Небольшие увеличения использовали для изучения общей морфологии поверхности и выявления макроскопических дефектов, таких как трещины, поры и распределение армирующих частиц. Более высокие увеличения применяли для анализа микроструктурных деталей, включая межфазную границу между ПЭЭК-матрицей и армирующими частицами, морфологию отдельных частиц и микродефекты (микротрещины, поры), которые могут негативно влиять на механические свойства материала.

Для изучения микроструктурных особенностей, структуры поверхности и элементного состава исследуемых материалов, а именно чистого акрилата (базовый материал), композита с 5 масс. % ПЭЭК в акрилате и композита с 10 масс. % ПЭЭК в акрилате [28], применяли методы энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Использование данных методов необходимо для оценки распределения армирующих частиц ПЭЭК в акрилатной матрице и выявления потенциальных микроструктурных дефектов, способных ухудшить эксплуатационные характеристики материала в биомедицине.

Качество подготовки образцов имеет решающее значение для получения достоверных

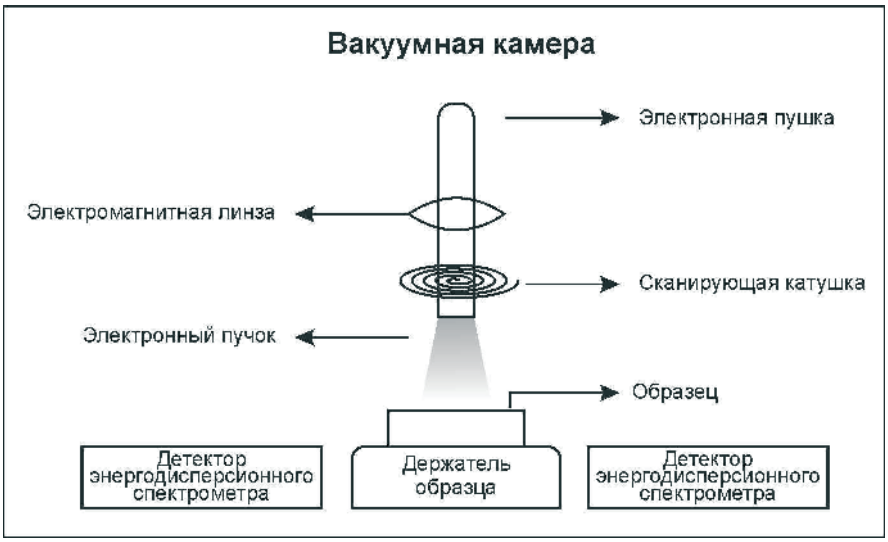


Рис. 3. Принцип работы сканирующего электронного микроскопа (СЭМ)

Fig. 3. Working principle of scanning electron microscope (*SEM*)

данных СЭМ-анализа и формирования изображений высокого разрешения. Образцы были нарезаны на фрагменты размером приблизительно 10×10 мм, что обеспечивало их размещение в рабочей камере микроскопа.

Подготовленные фрагменты подвергали последовательной полировке. На первом этапе проводили шлифовку поверхности с использованием абразивной бумаги на основе карбида кремния с зернистостью от 320 (для удаления крупных дефектов) до 1200 (для тонкой шлифовки). Затем для придания поверхности зеркального блеска осуществляли полировку алмазными пастами с размером частиц 3 и 1 мкм. Этот этап является критически важным, поскольку позволяет снизить шероховатость поверхности, что минимизирует артефакты при формировании СЭМ-изображений.

Энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС)

Для детального элементного анализа образцов в сочетании с СЭМ применяли метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Метод ЭДС основан на идентификации характеристического рентгеновского излучения, которое испускается образцом при его бомбардировке электронным пучком сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Энергия этих рентгеновских лучей специфична для каждого элемента, присутствующего в образце, что позволяет идентифицировать и количественно определять их содержание. Для всесторонней оценки состава материала ЭДС-анализ был выполнен в нескольких областях каждого образца. В частности, точечный анализ использовался для определения элементного состава в выбранных локальных областях, в основном в армирующих частицах и ПЭЭК-матрице. Схема работы ЭДС-спектрометра представлена на рис. 4.

Кроме того, для визуализации распределения элементов по образцу было проведено элементное картирование на более крупных участках. Эта методика оказалась особенно полезной для оценки равномерности распределения армирующих частиц в ПЭЭК-матрице. Анализ ЭДС-спектров предоставил важные данные о присутствии углерода (C) и кислорода (O) как основных элементов ПЭЭК, а также других элементов, входящих в состав армирующих частиц. Однородность композитов оценивалась на основе сопоставления распределения элементов в различных анализируемых областях. Существенные отклонения в элементном составе свидетельствовали о сегрегации или агломерации армирующих частиц, что может оказывать влияние на механические свойства композиционных материалов. Параметры анализа СЭМ и ЭДС объединены и представлены в табл. 1.

Испытание на изнашивание по схеме «стержень – диск»

Для оценки износостойкости материалов на основе полиэфирэфиркетона, а именно базового акрилатного материала, композитов акри-

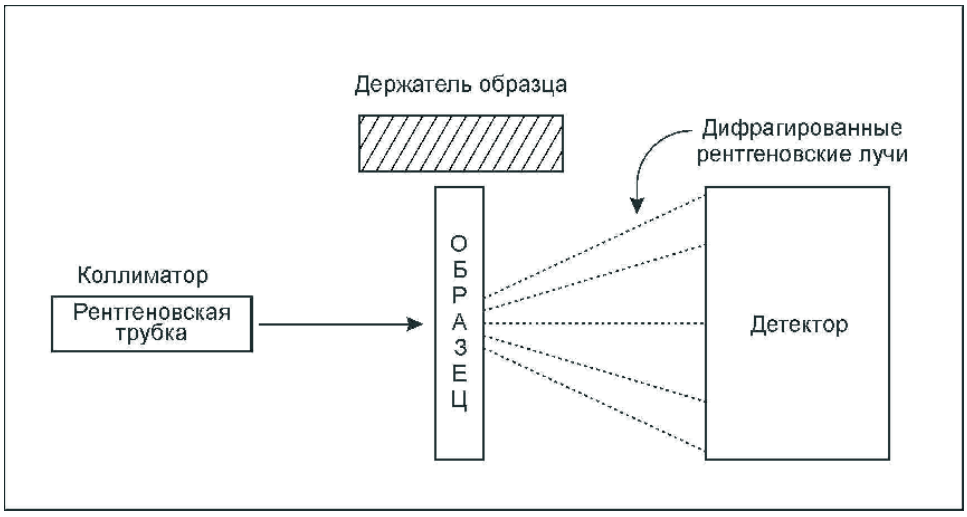


Рис. 4. Схематическое представление принципа работы прибора для энергодисперсионной спектроскопии

Fig. 4. Schematic representation of working principle of *EDS* instrument

Таблица 1
Table 1

Параметры СЭМ и ЭДС
Summary of SEM and EDS Conditions

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение	20 кВ
Диапазон увеличения	500×, 1000×, 2000×, 5000×
Материал покрытия	Золото (Au), толщина ~10 нм
ЭДС-анализ	Элементное картирование и точечный анализ

лата с 5 масс. % ПЭЭК и композитов акрилата с 10 масс. % ПЭЭК, было проведено испытание на изнашивание по схеме «стержень – диск». Образцы для испытаний представляли собой цилиндрические стержни, изготовленные механической обработкой из каждого типа материала. Размеры стержней составляли 8 мм в диаметре и 40 мм в высоту. Для обеспечения гладкого и равномерного контакта с диском в процессе испытаний поверхность стержней полировали с использованием абразивной бумаги на основе карбида кремния, а затем алмазной пастой. Испытания на изнашивание проводили на машине трения, сконфигурированной по схеме «стержень – диск». Схема установки представлена на рис. 5, она включает в себя гирю для создания постоянной нагрузки на стержень, двигатель для вращения диска и контртело в виде диска из нержавеющей стали марки SS316 с шероховатостью поверхности 0,1 мкм для обеспечения контролируемой и стабильной поверхности контакта.

Для обеспечения воспроизводимости результатов и поддержания однородности условий испытаний все экспериментальные параметры были стандартизованы. Нормальная нагрузка величиной 10 Н прикладывалась к каждому стержню с помощью набора гирь. Диск вращался с постоянной скоростью скольжения 1 м/с для моделирования условий изнашивания, характерных для изнашивания ортопедических имплантатов. Продолжительность каждого испытания соответствовала суммарному пути скольжения 1000 м, что обеспечивало сбор достаточного объема данных об изнашивании. Машина трения была предварительно откалибрована для обеспечения высокой точности поддержания заданной нагрузки, скорости скольжения и скорости вращения диска. Во время испытания вертикально установленные стержни оказывали постоянное

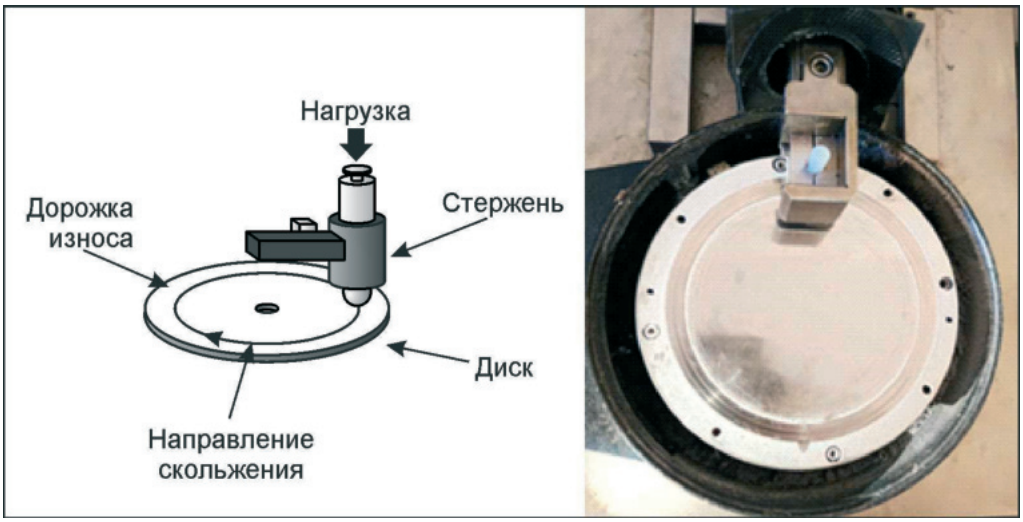


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для испытаний на изнашивание

Fig. 5. Experimental test set up used for wear testing study

давление на вращающийся диск из нержавеющей стали, вызывая изнашивание в результате скользящего контакта.

После завершения испытаний изношенные поверхности стержней анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для изучения механизмов изнашивания и особенностей деградации поверхности, характерных для каждого композиционного материала ПЭЭК. Особое внимание уделялось морфологии поверхности для установления связи между уровнем армирования и характеристиками износа. Основные параметры испытаний на износ по схеме «стержень – диск» (материалы, нагрузка, скорость и путь скольжения) представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры испытания на износ «стержень – диск»
Summary of Pin-on-Disk Testing Conditions

Параметр	Значение
Материал стержня	5 масс. % ПЭЭК в акрилате, 10 масс. % ПЭЭК в акрилате
Материал диска	SS 316
Нормальная нагрузка	10 Н
Скорость скольжения	1 м/с
Путь скольжения	1000 м

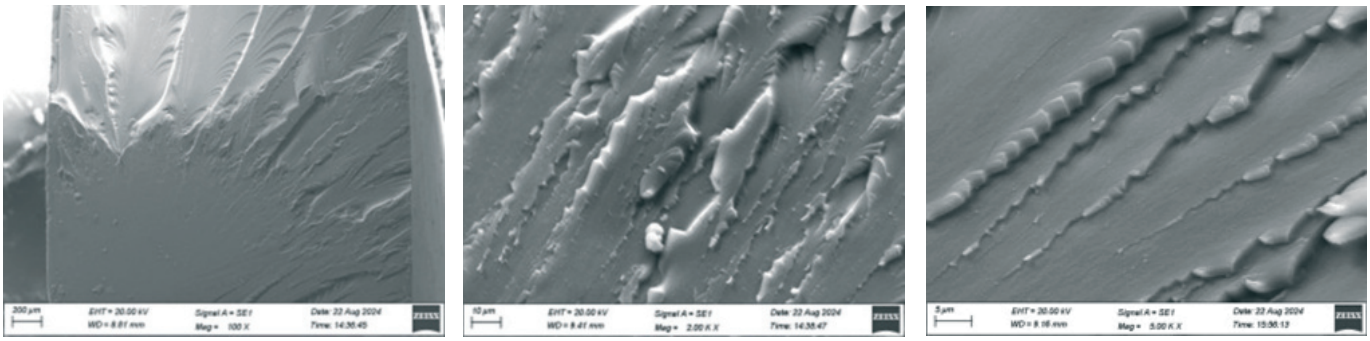
Результаты и их обсуждение

Композитный биоматериал на основе ПЭЭК в акрилатном связующем, изготовленный методом 3D-печати, был детально изучен на предмет применимости в эндопротезировании тазобедренного сустава. В рамках данного исследования разработан новый биоматериал – композит на основе ПЭЭК в акрилате – с различным содержанием ПЭЭК (0, 5 и 10 % по массе) в акрилатном связующем. Проведены испытания по определению свойств материала, его биосовместимости и технологичности 3D-печати. Стандартные образцы в форме стержней (соответствующие стандартам ASTM) были изготовлены методом 3D-печати с использованием цифрового проектора (DLP) при комнатной температуре. Выполнено экспериментальное исследование изнашивания при сухом трении скольжения композитов ПЭЭК с различными процентными концентрациями в акрилатном связующем. В качестве контртела использовали диск из стали марки SS316. Целью испытаний являлась оценка влияния содержания ПЭЭК на прочность и скорость изнашивания. Для анализа структуры поверхности и элементного состава материалов применяли методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Результаты и выводы, полученные в ходе СЭМ- и ЭДС-анализа, а также испытаний на изнашивание, представлены ниже.

Характеристика базового акрилатного материала

Морфология поверхности и микроструктурные особенности

Базовый материал был исследован методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при увеличениях от 500× до 5000× (рис. 6, *а–в*) с использованием ускоряющего напряжения 20 кВ. Параметры съемки были оптимизированы для детального анализа структуры поверхности и микроскопических характеристик материала, что позволило выявить как крупномасштабные, так и мелкомасштабные особенности. СЭМ-изображения, полученные при увеличении 500×, демонстрируют преимущественно ровную поверхность с равномерно распределенными мелкими неровностями. Гладкая морфология поверхности этого полимера свидетельствует о высоком качестве производственного процесса и отсутствии макроскопических дефектов, таких



а *б* *в*

Рис. 6. СЭМ-изображения базового акрилатного материала при различном увеличении:
а – увеличение 100×, 200 мкм; *б* – увеличение 2000×, 10 мкм; *в* – увеличение 5000×, 5 мкм

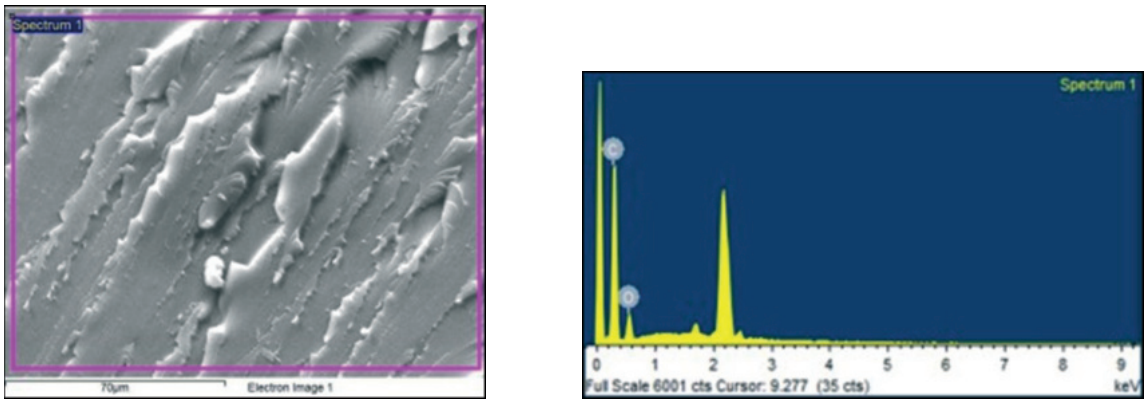
Fig. 6. SEM images for base Acrylate material at different magnification:
а – 100× magnification, 200 μm; *б* – 2,000× magnification, 10 μm; *в* – 5,000× magnification, 5 μm

как поры или включения. При увеличении 1000× и 2000× текстура поверхности стала более выраженной, обнаруживая особенности в диапазоне размеров 1…2 мкм. Вероятно, эти особенности обусловлены составом полимера, который может приводить к незначительным вариациям текстуры поверхности, возникающим в процессе производства. Равномерное распределение этих характеристик предполагает контролируемую обработку материала, обеспечивающую однородную поверхность, что способствует его повышенной механической прочности.

При увеличении до 5000× микроструктура материала стала более различимой (рис. 6, *в*). СЭМ-изображения выявили гладкую и однородную текстуру без каких-либо видимых кристаллических образований, что указывает на преимущественно аморфную структуру базового материала. Отсутствие наблюдаемых кристаллических доменов позволяет предположить, что материал специально разработан для применений, требующих гибкости и устойчивости к ударным нагрузкам, которые часто присущи аморфным полимерам.

ЭДС-анализ и элементный состав

На рис. 7, *а*, *б* представлены результаты ЭДС-анализа базового акрилатного материала. ЭДС-исследование позволило количественно определить элементный состав базового мате-



а *б*

Рис. 7. Анализ методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) базового акрилатного материала:
а – спектр с размером 70 мкм; *б* – ЭДС-график для спектра размером 70 мкм

Fig. 7. EDS analysis for base acrylate material:
а – spectrum with 70 μm; *б* – EDS graph for 70 μm Spectrum

риала, показав, что он в основном состоит из углерода (C) и кислорода (O). В одной области элементный состав был определен как ~ 71,17 масс. % углерода и ~ 28,83 масс. % кислорода, в другой области как ~ 72,21 масс. % углерода и ~ 27,79 масс. % кислорода. Состав веществ соответственно был определен как 76,68 масс. % углерода и 23,32 масс. % кислорода; 77,59 масс. % углерода и 22,41 масс. % кислорода.

Высокое содержание углерода является характерной особенностью полимерных материалов, в которых углерод играет роль основного структурного элемента, что также показано на рис. 7, *б*. Обнаруженный кислород, вероятно, связан с наличием функциональных групп, таких как карбонильные (C=O) или эфирные (C-O-C) группы, которые характерны для полимеров, например ПЭЭК (полиэфирэфиркетон). Эти группы способствуют повышению термической стабильности и химической стойкости материала, улучшая его эксплуатационные характеристики в жестких условиях.

Характеристика материала на основе акрилата с 5 масс. % ПЭЭК

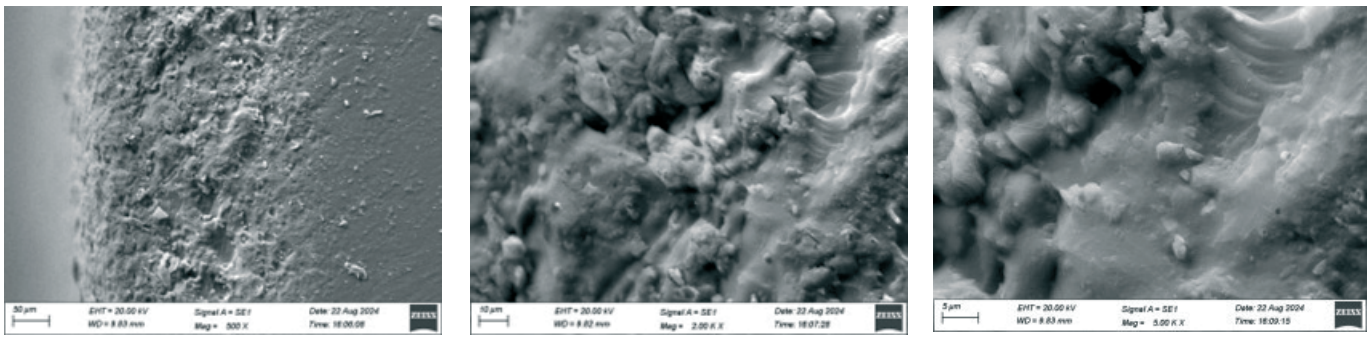
Морфология поверхности и микроструктурные особенности

На рис. 8, *а–в* представлены SEM-изображения акрилатного материала с 5 масс. % ПЭЭК, полученные при различных увеличениях. Анализ композиционного материала с помощью сканирующей электронной микроскопии был выполнен для изучения морфологии его поверхности и микроструктуры. Использовали увеличения от 500× до 5000× при ускоряющем напряжении 20 кВ. Этот диапазон позволил провести комплексную оценку как общих характеристик поверхности, так и микроструктурных особенностей, и предоставил ценную информацию о влиянии добавления ПЭЭК в полимерную матрицу (рис. 8, *а*).

При увеличении 500× СЭМ-изображения демонстрируют относительно гладкую и однородную поверхность с минимальными отклонениями, сопоставимыми с таковыми у исходного материала. Однако добавление ПЭЭК привело к незначительным изменениям в текстуре поверхности. Эти изменения, вероятно, обусловлены диспергированием ПЭЭК в полимерной матрице.

Более детальное изучение микроструктуры материала проводилось при увеличениях 1000× и 2000×. Частицы ПЭЭК видны как отдельные и относительно равномерно распределенные фазы внутри матрицы. Их размеры находятся в микронном диапазоне, составляя от 1 до 2 мкм. Наблюдаемое распределение свидетельствует об эффективности добавления ПЭЭК в матрицу, что способствует однородности композита.

При максимальном увеличении 5000× были получены изображения, демонстрирующие более детальную картину распределения ПЭЭК. Частицы ПЭЭК характеризуются хорошей дисперсией и органичной интеграцией в полимерную матрицу без заметных признаков агломерации. Добавление ПЭЭК не нарушает преимущественно аморфную структуру материала, что важно для сохранения его гибкости



а *б* *в*

Рис. 8. СЭМ-изображения акрилатного материала с 5 масс. % ПЭЭК при различном увеличении:
а – увеличение 500×, 50 мкм; *б* – увеличение 2000×, 10 мкм; *в* – увеличение 5000×, 5 мкм

Fig. 8. SEM images for 5 wt. % *PEEK* in Acrylate material at different magnification:
а – 500× magnification, 50 μm; *б* – 2,000× magnification, 10 μm; *в* – 5,000× magnification, 5 μm

и прочности. В целом поверхность сохраняет аморфный вид.

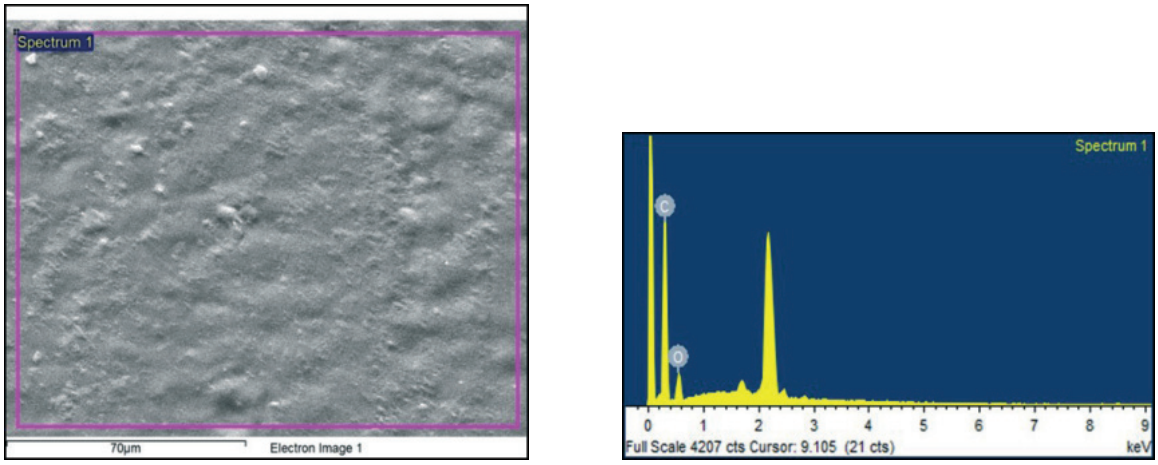
ЭДС-анализ и элементный состав

Энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) композитного материала на основе 5 масс. % полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) показала, что его элементный состав представлен преимущественно углеродом (С) и кислородом (О), что соответствует составу базового акрилатного материала (рис. 9).

В табл. 3 представлены данные о составе композитного материала на основе акрилата с 5 масс. % ПЭЭК.

Массовое содержание углерода составило около 70,75 %, а кислорода – 29,25 %. Атомные доли элементов составляют 76,32 % для углерода и 23,68 % для кислорода. Полученные результаты указывают на близость элементного состава базового акрилатного материала и композита с ПЭЭК, что свидетельствует о незначительном влиянии добавления ПЭЭК на общий элементный состав. Небольшое увеличение содержания кислорода объясняется присутствием богатых кислородом функциональных групп в ПЭЭК (таких как эфирные и карбонильные группы), которые равномерно распределены в полимерной матрице.

Как следует из СЭМ-изображений, введение 5 масс. % ПЭЭК в полимерную матрицу приводит к формированию характерных микроструктурных особенностей. Вероятно, равномерное распределение частиц ПЭЭК в матрице способствует повышению механических свойств материала, таких как жесткость и прочность, за счет армирования полимерной структуры. Несмотря на добавление ПЭЭК, композит сохраняет преимущественно аморфную структуру, что благоприятно сказывается на сохранении таких важных характеристик, как ударная вязкость.



а *б*

Рис. 9. ЭДС-анализ акрилатного материала с 5 масс. % ПЭЭК:
а – спектр 70 мкм; *б* – ЭДС-график для спектра 70 мкм

Fig. 9. EDS analysis for 5 wt. % *PEEK* in Acrylate material:
а – spectrum with 70 µm; *б* – *EDS* graph for 70 µm spectrum

Таблица 3
Table 3

Состав композиционного материала на основе акрилата с 5 масс. % ПЭЭК
Composition of 5 % wt. PEEK in Acrylate composites Material

Элемент	Массовый %	Атомный %
C	70,75	76,32
O	29,25	23,68
Итого	100,00	–

Данные ЭДС подтверждают, что элементный состав композита в основном остается неизменным, с преобладанием углерода и кислорода. Незначительное увеличение концентрации кислорода указывает на успешную интеграцию ПЭЭК в матрицу, что свидетельствует об отсутствии выраженного фазового разделения и неоднородностей.

Характеристика материала на основе акрилата с 10 масс. % ПЭЭК

Морфология поверхности и микроструктурные особенности

Композиционный материал, содержащий 10 масс. % ПЭЭК, был исследован методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при увеличениях от 500× до 5000× и ускоряющем напряжении 20 кВ (рис. 10, *а–в*). Данный подход позволил детально изучить морфологию поверхности и микроструктуру материала, а также оценить влияние повышенного содержания ПЭЭК на его структуру.

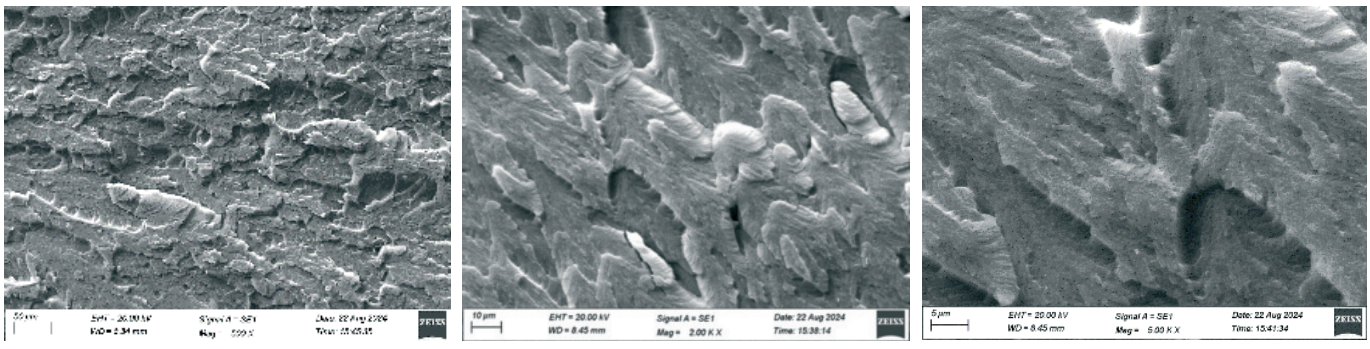
При увеличении 500× поверхность материала характеризовалась относительно гладкой текстурой, сопоставимой с материалами, содержащими меньшую концентрацию ПЭЭК. Однако более высокая концентрация ПЭЭК приводила к более заметным изменениям в текстуре, что указывает на существенное влияние частиц ПЭЭК на состав поверхности. Наблюдаемые изменения были незначительными, но стабильными, что свидетельствует о равномерном распределении ПЭЭК в матрице (рис. 10, *б*). При увеличении до 2000× частицы ПЭЭК стали более различимы. Они наблюдались как отдельные включения в полимерной матрице, имеющие размер около 1…2 мкм. Характер распределения указывает на хорошую интеграцию ПЭЭК в базовый материал, что способствует повышению структурной однородности и, как следствие, повышению механических свойств композита.

При увеличении 5000× (рис. 10, *в*) СЭМ-изображения позволили получить более детальную информацию о микроструктурных особенностях, подтвердив равномерное распределение частиц ПЭЭК и отсутствие признаков их агломерации. Поверхность сохраняла аморфную структуру, при этом присутствие ПЭЭК обусловливало незначительные вариации текстуры, не нарушающие общей гладкости материала. Такое гомогенное распределение компонентов критически важно для достижения оптимального соотношения гибкости и прочности, что необходимо для целевого применения данного материала.

ЭДС-анализ и элементный состав

ЭДС-анализ позволил получить точные и количественные данные об элементном составе материала с 10 масс. % ПЭЭК. Основными идентифицированными элементами были углерод (C) и кислород (O), что соответствует составу ПЭЭК и базового полимера (рис. 11).

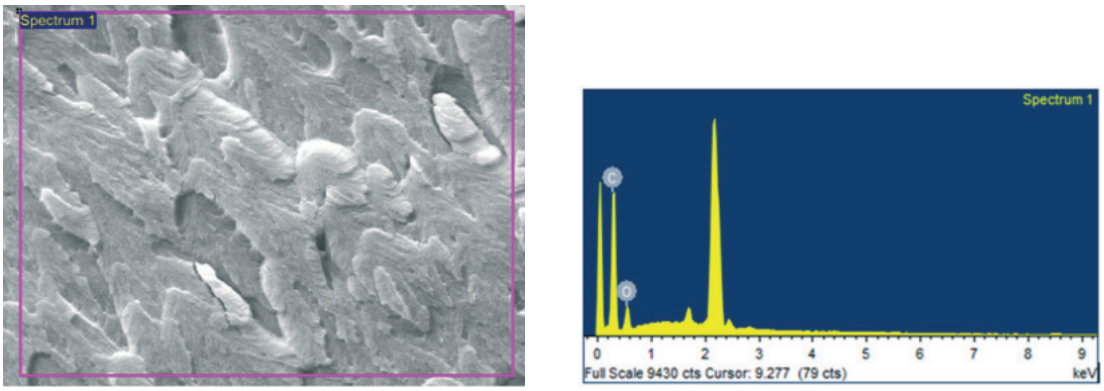
В табл. 4 представлен элементный состав композитного материала на основе акрилата с 10 масс. % ПЭЭК. Вещество в определенной области состояло примерно из 70,19 масс. % углерода и 29,81 масс. % кислорода. В других



а *б* *в*

Рис. 10. СЭМ-изображения акрилатного материала с 10 масс. % ПЭЭК при различном увеличении:
а – увеличение 500×, 50 мкм; *б* – увеличение 2000×, 10 мкм; *в* – увеличение 5000×, 5 мкм

Fig. 10. SEM images for 10 wt. % *PEEK* in Acrylate material at different magnification:
а – 500× magnification, 50 μm; *б* – 2,000× magnification, 10 μm; *в* – 5,000× magnification, 5 μm



а *б*

Рис. 11. ЭДС-анализ акрилатного композитного материала с 10 масс. % ПЭЭК:
а – спектр 70 мкм; *б* – ЭДС-график для спектра 70 мкм

Fig. 11. EDS analysis for 10 wt. % *PEEK* in Acrylate material:
а – spectrum with 70 μm; *б* – *EDS* graph for 70 μm spectrum

Таблица 4
Table 4

Состав композиционного материала на основе акрилата с 10 % масс. ПЭЭК
Composition of 10 % wt. PEEK in Acrylate composites Material

Элемент	Массовый %	Атомный %
C	70,19	75,82
O	29,81	24,18
Итого	100,00	–

местах наблюдались дополнительные элементы, такие как золото (Au), которые были нанесены на поверхность для улучшения контраста изображения. Распределение элементов подтверждает, что присутствие ПЭЭК существенно не влияет на основной состав, но вносит функциональные группы, связанные с химической структурой ПЭЭК. Колебания уровня кислорода в разных местах могут быть связаны с наличием функциональных групп, важных для свойств ПЭЭК, включая его термическую стабильность и устойчивость к суровым условиям. Данные сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) в совокупности показывают, что добавление 10 масс. % ПЭЭК к базовому материалу оказывает существенное влияние на микроструктуру, особенно по сравнению с меньшими концентрациями ПЭЭК.

СЭМ-изображения показывают равномерное распределение частиц ПЭЭК, что, в свою очередь, приводит к повышению механических свойств, таких как жесткость и прочность на растяжение. Это повышение механических свойств можно объяснить армирующим действием частиц в полимерной матрице. Собственная аморфная структура материала, которая сохраняется даже при более высокой концентрации ПЭЭК, выгодна для поддержания его гибкости и ударной вязкости. ЭДС-анализ подтверждает эти выводы, демонстрируя, что состав материала в основном соответствует составу ПЭЭК, при этом углерод и кислород являются основными компонентами. Включение частиц ПЭЭК не приводит к значительному расслоению фаз, тем самым поддерживая однородную структуру композита.

Обсуждение. Введение ПЭЭК в акрилатную полимерную матрицу в концентрации 5 или 10 масс. % повышает механические свойства материала за счет упрочнения структуры, при этом материал сохраняет гибкость и гладкость поверхности. Эти композиты обладают гармоничным сочетанием прочности, долговечности и адаптируемости, что делает их оптимальными кандидатами для изделий, работающих

в условиях, где эти характеристики важны. Выбор между содержанием ПЭЭК 5 и 10 масс. % будет зависеть от точных требований к механическим свойствам материала в зависимости от предполагаемой области применения, где более высокие концентрации ПЭЭК обеспечат повышенную жесткость и прочность.

Результаты испытаний на изнашивание

Результаты испытаний на изнашивание по схеме «стержень – диск», проведенных на образцах из базового акрилата, композита акрилата с 5 масс. % ПЭЭК и композита акрилата с 10 масс. % ПЭЭК, наглядно демонстрируют влияние армирования ПЭЭК на износостойкость и фрикционные свойства акрилата.

В табл. 5 представлены результаты экспериментальных наблюдений, полученных в ходе испытаний на изнашивание по схеме «стержень – диск». Систематический анализ коэффициентов трения, скорости изнашивания и СЭМ-изображений изношенных поверхностей четко показывает преимущества армирования для улучшения трибологических свойств ПЭЭК в приложениях, где материал подвергается нагрузкам.

Результаты испытаний на изнашивание демонстрируют выраженную взаимосвязь между степенью армирования, износостойкостью и фрикционными характеристиками для базового акрилата, композита из акрилата с 5 масс. % ПЭЭК и композита из акрилата с 10 масс. % ПЭЭК. Базовый акрилат продемонстрировал коэффициент трения 0,45 и самую высокую скорость изнашивания, составившую $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ мм^3/Н·м.

СЭМ-анализ поверхности базового акрилата выявил видимые следы износа и незначительное удаление материала, это свидетельствует о его ограниченной износостойкости, что ожидаемо для неармированного полимера. Коэффициент трения для композита из акрилата с 5 масс. % ПЭЭК снизился до 0,40, а скорость изнашивания уменьшилась до $0{,}9 \cdot 10^{-6}$ мм^3/Н·м. СЭМ-изображения поверхности композита с 5 масс. % ПЭЭК показали повышенную однородность и умеренные следы износа, это указывает на то,

Таблица 5
Table 5

Результаты испытания на изнашивание по схеме «стержень – диск»
Experimental Observation Table for Pin-on-Disk Wear Test

Тип материала	Нормальная нагрузка, Н	Скорость скольжения, м/с	Путь скольжения, м	Скорость износа, мм³/Н·м	Коэффициент трения	Данные СЭМ
Базовый акрилат	10	1	1000	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	0,45	Гладкая поверхность с легкими следами износа; наблюдается незначительное удаление материала
Композит из акрилата с 5 масс. % ПЭЭК	10	1	1000	$0{,}9 \cdot 10^{-6}$	0,4	Повышенная однородность поверхности: умеренные следы износа, но меньшие потери материала по сравнению с базовым акрилатом
Композит из акрилата с 10 масс. % ПЭЭК	10	1	1000	$0{,}7 \cdot 10^{-6}$	0,35	Повышенная однородность поверхности; минимальные следы износа, что указывает на более высокую износостойкость

что введение 5 масс. % армирующих частиц повышает структурную целостность материала и, как следствие, его износостойкость.

Композит из акрилата с 10 масс. % ПЭЭК продемонстрировал наилучшую износостойкость среди испытанных материалов: скорость износа составила $0{,}7 \cdot 10^{-6}$ мм^3/Н·м, а коэффициент трения – 0,35. СЭМ-изображения поверхности композита акрилата с 10 масс. % ПЭЭК выявили высокую однородность и минимальные следы износа, что свидетельствует о значительном улучшении износостойкости при данной концентрации армирующего компонента. Такое улучшение, вероятно, обусловлено равномерным распределением армирующих частиц, которое эффективно предотвращает деградацию материала под действием трения и нагрузки. Увеличение степени армирования от базового акрилата до композита с 10 масс. % ПЭЭК приводит как к повышению износостойкости, так и к улучшению фрикционных свойств. Таким образом, повышение структурной целостности композита достигается за счет увеличения степени армирования, что снижает эрозию и трение в условиях высоких нагрузок.

На рис. 12 показан ацетабулярный вкладыш, изготовленный методом DLP 3D-печати из композиционного биоматериала на основе акрилата с 10 масс. % ПЭЭК. Это позволяет сделать вывод о том, что биоматериал на основе акрилата с 10 масс. % ПЭЭК подходит для 3D-печати при комнатной температуре с целью получения желаемой геометрии ортопедических имплантатов.

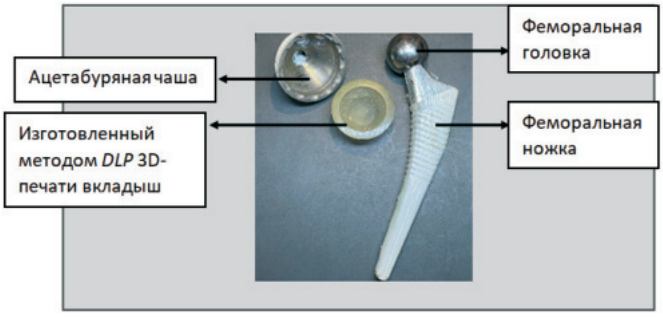


Рис. 12. Вкладыш тазобедренного имплантата, изготовленный методом DLP 3D-печати из акрилатного композита с 10 масс. % ПЭЭК

Fig. 12. DLP 3D-printed hip joint implant liner made from acrylate composite with 10 wt % *PEEK*

Заключение

Настоящее исследование подчеркивает превосходные свойства биоматериалов на основе композита из акрилата с 10 масс. % ПЭЭК, демонстрируя их повышенную износостойкость и повышенные механические свойства по сравнению с композитами из акрилата с меньшим содержанием ПЭЭК и базовым акрилатом.

– Композиционный биоматериал на основе акрилата с 10 масс. % ПЭЭК обладает оптимальным сочетанием прочности, жесткости и пластичности, что критически важно для нагруженных изделий, таких как ортопедические имплантаты. Испытания на изнашивание по схеме «стержень – диск» показали значительное снижение удельной скорости изнашивания композита с 10 масс. % ПЭЭК при различных нагрузках и скоростях, что подтверждает его пригодность для использования в условиях высоких механических напряжений.

– Результаты СЭМ- и ЭДС-исследований подтвердили равномерное распределение частиц ПЭЭК в полимерной матрице, что обеспечивает повышенные механические свойства и долговечность композитного материала.

– Способность композита из акрилата с 10 масс. % ПЭЭК сохранять механическую прочность в сложных трибологических условиях делает его перспективным материалом для долгосрочного применения в ортопедии, особенно в суставных имплантатах, где износостойкость и механические характеристики имеют решающее значение для успешной имплантации.

– Улучшенная износостойкость и повышенная механическая прочность этого композита позволяют снизить риск выхода имплантата из строя вследствие деградации материала, что является важным фактором, определяющим срок службы имплантатов тазобедренных суставов.

– Композиционный биоматериал на основе акрилата с 10 масс. % ПЭЭК может быть использован для DLP 3D-печати при комнатной температуре, а полученные изделия пригодны для изготовления из них биомедицинских имплантатов, протезов, тканевой инженерии и в других областях здравоохранения.

Тем не менее для полного понимания поведения данных композиционных материалов в реальных клинических условиях необходимы дальнейшие исследования.

В будущих исследованиях следует уделить внимание испытаниям на усталость для оценки прочности материала при циклических нагрузках, имитирующих нагрузки, которые возникают в имплантатах, установленных в теле человека.

Кроме того, необходимы клинические исследования для подтверждения биосовместимости и эффективности данного материала в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. The needs of current implant technology in orthopaedic prosthesis biomaterials application to reduce prosthesis failure rate / J.R. Ahmad, F.M. Aldo, S. Ifran, K. Tri, W. Yudan // Journal of Nanomaterials. – 2016. – Art. 5386924. – DOI: 10.1155/2016/5386924.

2. *Garcia E., Fernandez A., Martin L.* Comparative analysis of traditional and advanced materials for hip joint implants // Materials Science and Engineering C. – 2020. – Vol. 112. – P. 110857. – DOI: 10.1080/17453674.2018.1427320.

3. Developments of PEEK (Polyetheretherketone) as a biomedical material: a focused review / S. Verma, N. Sharma, S. Kango, S. Sharma // European Polymer Journal. – 2021. – Vol. 147. – P. 110295. – DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110295.

4. PEEK for oral applications: recent advances in mechanical and adhesive properties / C. Luo, Y. Liu, B. Peng, M. Chen, Z. Liu, Z. Li, H. Kuang, B. Gong, Z. Li, H. Sun // Polymers. – 2023. – Vol. 15 (2). – DOI: 10.3390/polym15020386.

5. 3D printing for hip implant applications: a review / O. Obinna, I. Stachurek, B. Kandasubramanian, J. Njuguna // Polymers. – 2020. – Vol. 12 (11). – P. 2682. – DOI: 10.3390/polym12112682.

6. 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.

7. Rapid construction of polyetheretherketone (PEEK) biological implants incorporated with brushite ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) and antibiotics for anti-infection and enhanced osseointegration / Z. Xue, Z. Wang, A. Sun, J. Huang, W. Wu, M. Chen, X. Hao, Z. Huang, X. Lin, S. Weng // Materials Science & Engineering: C. – 2020. – Vol. 111. – P. 110782. – DOI: 10.1016/j.msec.2020.110782.

8. 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 (10). – P. 1845–1861. – DOI: 10.1007/s40544-022-0700-z.

9. Bioactive PEEK: surface enrichment of vitronectin-derived adhesive peptides / L. Cassari, A. Zamuner, G.M.L. Messina, M. Marsotto, H. Chen, G. Gonnella, T. Coward, C. Battocchio, J. Huang, G. Iucci, G. Marletta, L. Di Silvio, M. Dettin // Biomolecules. – 2023. – Vol. 13 (2). – P. 246. – DOI: 10.3390/biom13020246.

10. *Yu D., Lei X., Zhu H.* Modification of polyetheretherketone (PEEK) physical features to improve osteointegration // Journal of Zhejiang University-Science B. – 2022. – Vol. 23 (3). – P. 189–203. – DOI: 10.1631/jzus.B2100622.

11. 3D-printed PEEK/silicon nitride scaffolds with a triply periodic minimal surface structure for spinal fusion implants / X. Du, S. Ronayne, S.S. Lee, J. Hendry, D. Hoxworth, R. Bock, S.J. Ferguson // ACS Applied Bio Materials. – 2023. – Vol. 6 (8). – P. 3319–3329. – DOI: 10.1021/acsabm.3c00383.

12. Tailoring the biologic responses of 3D printed PEEK medical implants by plasma functionalization / X. Han, N. Sharma, S. Spintzyk, Y. Zhou, Z. Xu, F.M. Thieringer, F. Rupp // Dental Materials. – 2022. – Vol. 38 (7). – P. 1083–1098. – DOI: 10.1016/j.dental.2022.04.026.

13. *Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S.* Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing processes for engineering design features: a study and recommendations // Communications on Applied Nonlinear Analysis. – 2024. – Vol. 31 (1s). – DOI: 10.52783/cana.v31.559.

14. 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.

15. A comprehensive mechanical characterization of as-printed and saliva soaked 3D printed PEEK specimens for low-cost dental implant applications / K.U.K. Reddy, P.C. Verma, A. Rathi, P. Saravanan // Materials Today Communications. – 2023. – Vol. 36. – P. 106438. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106438.

16. Preclinical evaluation of a mini-arthroplasty implant based on polyetheretherketone and Ti6AI4V for treatment of a focal osteochondral defect in the femoral head of the hip / W. Zhang, Z. Yuan, X. Meng, J. Zhang, T. Long, Z. Yaochao, C. Yang, R. Lin, B. Yue, Q. Guo, Y. Wang // Biomedical Materials. – 2020. – Vol. 15 (5). – P. 055027. – DOI: 10.1088/1748-605x/ab998a.

17. 3D-printed PEEK/silicon nitride scaffolds with a triply periodic minimal surface structure for spinal

fusion implants / X. Du, S. Ronayne, S.S. Lee, J. Hendry, D. Hoxworth, R. Bock, S.J. Ferguson // ACS Applied Bio Materials. – 2023. – Vol. 6 (8). – P. 3319–3329. – DOI: 10.1021/acsabm.3c00383.

18. Design and biomechanical verification of additive manufactured composite spinal cage composed of porous titanium cover and PEEK body / K.M. Lim, T.H. Park, S.J. Lee, S.J. Park // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9 (20). – P. 4258. – DOI: 10.3390/app9204258.

19. 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.

20. Effect of porous orthopaedic implant material and structure on load sharing with simulated bone ingrowth: a finite element analysis comparing titanium and PEEK / R.D. Carpenter, B.S. Klosterhoff, F.B. Torstrick, K.T. Foley, J.K. Burkus, C.S. Lee, K. Gall, R.E. Guldberg, D.L. Safranski // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2018. – Vol. 80. – P. 68–76. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.01.017.

21. *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). – DOI: 10.1063/5.0035408.

22. Experimental investigation of dry sliding wear behavior 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. *Чинчаникар С.* Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12Х18Н10Т) // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

25. *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 (1). – P. 25–29. – DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.

26. *Pal S., Gaikwad Y., Asha S.K.* Room temperature photocurable PEEK polymer formulations for high-performance 3D printing applications // ACS Applied Engineering Materials. – 2024. – Vol. 2 (6). – P. 1450–1459. – DOI: 10.1021/acsaenm.4c00275.

27. Biochar-reinforced PLA composite for fused deposition modeling (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.

28. Three-dimensional polyethylene wear of a press-fit titanium prosthesis / P.A. Devane, J.G. Horne, K. Martin, G. Coldham, B. Krause // The Journal of Arthroplasty. – 1997. – Vol. 12 (3). – DOI: 10.1016/S0883-5403(97)90021-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

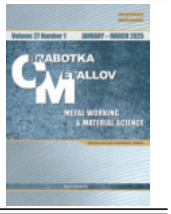
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 172–191
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-172-191

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



DLP 3D printing and characterization of PEEK-acrylate composite biomaterials for hip-joint implants

Yogiraj Dama [1, a, *], *Bhagwan Jogi* [1, b], *Raju Pawade* [1, c], *Shibam Pal* [2, d], *Yogesh Gaikwad* [2, e]

[1] Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, Maharashtra, 402103, India
[2] CSIR-National Chemical Laboratory, Pashan Pune, Maharashtra, 411008, 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/0000-0002-3681-5039, shibampal123456@gmail.com;
[e] https://orcid.org/0009-0003-3211-0861, ym.gaikwad@ncl.res.in

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 26 November 2024
Revised: 14 December 2024
Accepted: 06 January 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
3D Printing
Biomaterials
FDM
Implant
Print orientation
PLA
Wear behavior

ABSTRACT

Introduction. Hip joint replacement is considered the most complex and critically important orthopedic surgical procedure compared to knee and shoulder joint replacements. Over the past few decades, there has been significant advancement in hip joint replacement technology, and various biomaterials have been substantially improved. An increasing number of hip joint replacement surgeries are now successful, assisting individuals in regaining normal daily activity and work capacity comparable to their pre-fracture state. However, the need for revision surgery, specifically for implant replacement, is still observed in active patients several years following the initial operation. This underscores the need to develop durable biomaterials and customized hip joint implants to reduce implant wear and the risk of dislocation. This research study explores a novel *PEEK*-in-acrylate composite biomaterial with varied weight percentages of *PEEK* (0 %, 5 %, and 10 %) in an acrylate-based matrix. Tests were conducted to determine its properties, biocompatibility, and 3D printability. Based on the developed material, pins (in accordance with the *ASTM* standard) were fabricated using 3D printing for subsequent wear rate studies. The potential use of the developed composite materials for hip-joint applications was also thoroughly investigated. **The purpose of this study** is to develop and investigate a new *PEEK* in Acrylate composite biomaterial with varied weight percentages of *PEEK* (0 %, 5 %, and 10 %) in an acrylate-based matrix. The research includes an assessment of the material's properties, biocompatibility, and 3D printability. Using digital light processing (*DLP*) 3D printing technology at room temperature, pins (in accordance with the *ASTM* standard) were fabricated. An experimental study of dry sliding wear resistance was conducted on the resulting samples to determine the effect of *PEEK* weight fraction on the wear rate and frictional performance against an SS 316 steel disk. Scanning electron microscopy (*SEM*) and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were used to analyze the surface structure and element distribution within the material. **The Methods of Investigation.** Digital Light Processing (*DLP*) 3D Printing technique was used to 3D Print the *ASTM* pins and Acetabular liner with different weight fraction of *PEEK* in acrylate. Dry sliding wear tests were carried out using a pin-on-disk tribometer. During testing, the disk rotation speed and the normal load on the pin were varied. The studies were designed to determine the influence of input parameters on the wear rate. A total of nine experiments were conducted for each *PEEK* weight fraction, with a sliding distance of 4 km per experiment. The load ranged from 20 to 100 N, and the sliding speed varied from 450 to 750 rpm. Surface structure and element distribution were analyzed by Energy-dispersive X-ray spectroscopy (*EDS*) and Scanning electron microscopy (*SEM*). **Result and Discussion.** Current study demonstrates the advantages of varying the weight fraction of PEEK in Acrylate for *DLP*-fabricated biomaterials. Analysis of the *SEM*, *EDS*, and wear testing results indicated that the composite with 10 wt % *PEEK* in Acrylate exhibited superior microstructural integrity, elemental homogeneity, and significantly improved wear resistance. The 10 wt % *PEEK* in Acrylate composite, fabricated via *DLP* 3D printing, is suitable for biomedical implant and healthcare applications

For citation: Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R., Pal S., Gaikwad Y.M. DLP 3D printing and characterization of PEEK-acrylate composite biomaterials for hip-joint implants. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 172–191. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-172-191. (In Russian).

References

1. Ahmad J.R., Aldo F.M., Ifran S., Tri K., Yudan W. The needs of current implant technology in orthopaedic prosthesis biomaterials application to reduce prosthesis failure rate. *Journal of Nanomaterials*, 2016, art. 5386924. DOI: 10.1155/2016/5386924.

*** Corresponding author**
Jogi Bhagwan Fatru, Professor
Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University,
Lonere, Raigad,
402103, Maharashtra, India
Tel.: +91 942-116-6370, **e-mail:** bfjogi@dbatu.ac.in

2. Garcia E., Fernandez A., Martin L. Comparative analysis of traditional and advanced materials for hip joint implants. *Materials Science and Engineering C*, 2020, vol. 112, p. 110857. DOI: 10.1080/17453674.2018.1427320.

3. Verma S., Sharma N., Kango S., Sharma S. Developments of PEEK (Polyetheretherketone) as a biomedical material: a focused review. *European Polymer Journal*, 2021, vol. 147, p. 110295. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110295.

4. Luo C., Liu Y., Peng B., Chen M., Liu Z., Li Z., Kuang H., Gong B., Li Z., Sun H. PEEK for oral applications: recent advances in mechanical and adhesive properties. *Polymers*, 2023, vol. 15 (2). DOI: 10.3390/polym15020386.

5. Obinna O., Stachurek I., Kandasubramanian B., Njuguna J. 3D printing for hip implant applications: a review. *Polymers*, 2020, vol. 12 (11), p. 2682. DOI: 10.3390/polym12112682.

6. Dama Y., Jogi B., Pawade R., Kulkarni A. 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.

7. Xue Z., Wang Z., Sun A., Huang J., Wu W., Chen M., Hao X., Huang Z., Lin X., Wenig S. Rapid construction of polyetheretherketone (PEEK) biological implants incorporated with brushite ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) and antibiotics for anti-infection and enhanced osseointegration. *Materials Science & Engineering: C*, 2020, vol. 111, p. 110782. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110782.

8. 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 (10), pp. 1845–1861. DOI: 10.1007/s40544-022-0700-z.

9. Cassari L., Zamuner A., Messina G.M.L., Marsotto M., Chen H., Gonnella G., Coward T., Battocchio C., Huang J., Iucci G., Marletta G., Di Silvio L., Dettin M. Bioactive PEEK: surface enrichment of vitronectin-derived adhesive peptides. *Biomolecules*, 2023, vol. 13 (2), p. 246. DOI: 10.3390/biom13020246.

10. Yu D., Lei X., Zhu H. Modification of polyetheretherketone (PEEK) physical features to improve osteointegration. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2022, vol. 23 (3), pp. 189–203. DOI: 10.1631/jzus.B2100622.

11. Du X., Ronayne S., Lee S.S., Hendry J., Hoxworth D., Bock R., Ferguson S.J. 3D-printed PEEK/silicon nitride scaffolds with a triply periodic minimal surface structure for spinal fusion implants. *ACS Applied Bio Materials*, 2023, vol. 6 (8), pp. 3319–3329. DOI: 10.1021/acsabm.3c00383.

12. Han X., Sharma N., Spintzyk S., Zhou Y., Xu Z., Thieringer F.M., Rupp F. Tailoring the biologic responses of 3D printed PEEK medical implants by plasma functionalization. *Dental Materials*, 2022, vol. 38 (7), pp. 1083–1098. DOI: 10.1016/j.dental.2022.04.026.

13. Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S. Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing processes for engineering design features: a study and recommendations. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31 (1s). DOI: 10.52783/cana.v31.559.

14. 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.

15. Reddy K.U.K., Verma P.C., Rathi A., Saravanan P. A comprehensive mechanical characterization of as-printed and saliva soaked 3D printed PEEK specimens for low-cost dental implant applications. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 36, p. 106438. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106438.

16. Zhang W., Yuan Z., Meng X., Zhang J., Long T., Yaochao Z., Yang C., Lin R., Yue B., Guo Q. Wang Y. Preclinical evaluation of a mini-arthroplasty implant based on polyetheretherketone and Ti6AI4V for treatment of a focal osteochondral defect in the femoral head of the hip. *Biomedical Materials*, 2020, vol. 15 (5), p. 055027. DOI: 10.1088/1748-605x/ab998a.

17. Du X., Ronayne S., Lee S.S., Hendry J., Hoxworth D., Bock R., Ferguson S.J. 3D-printed PEEK/silicon nitride scaffolds with a triply periodic minimal surface structure for spinal fusion implants. *ACS Applied Bio Materials*, 2023, vol. 6 (8), pp. 3319–3329. DOI: 10.1021/acsabm.3c00383.

18. Lim K.M., Park T.H., Lee S.J., Park S.J. Design and biomechanical verification of additive manufactured composite spinal cage composed of porous titanium cover and PEEK body. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (20), p. 4258. DOI: 10.3390/app9204258.

19. 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.

20. Carpenter R.D., Klosterhoff B.S., Torstrick F.B., Foley K.T., Burkus J.K., Lee C.S., Gall K., Guldberg R.E., Safranski D.L. Effect of porous orthopaedic implant material and structure on load sharing with simulated bone

ingrowth: a finite element analysis comparing titanium and PEEK. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, vol. 80, pp. 68–76. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.01.017.

21. 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). DOI: 10.1063/5.0035408.

22. Paturkar A., Mache A., Deshpande A., Kulkarni A. Experimental investigation of dry sliding wear behavior 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. Chinchanikar 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.

25. 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 (1), pp. 25–29. DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.

26. Pal S., Gaikwad Y., Asha S.K. Room temperature photocurable PEEK polymer formulations for high-performance 3D printing applications. *ACS Applied Engineering Materials*, 2024, vol. 2 (6), pp. 1450–1459. DOI: 10.1021/acsaenm.4c00275.

27. Anerao P., Kulkarni A., Munde Y., Shinde A., Das O. Biochar-reinforced PLA composite for fused deposition modeling (FDM): a parametric study on mechanical performance. *Composites Part C: Open Access*, 2023, vol. 12, p. 100406. DOI: 10.1016/j.jcomc.2023.100406.

28. Devane P.A., Horne J.G., Martin K., Coldham G., Krause B. Three-dimensional polyethylene wear of a press-fit titanium prosthesis. *The Journal of Arthroplasty*, 1997, vol. 12 (3). DOI: 10.1016/S0883-5403(97)90021-8.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

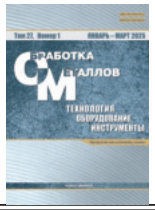
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 192–202
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-192-202

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние деформационной термоциклической обработки и нормализации на механические свойства листовой стали 10

Александр Прудников [1, a, *], *Светлана Галачиева* [2, b], *Бахыт Абсадыков* [3, c], *Гузель Шарипзянова* [4, d], *Елена Цыганко* [5, e], *Владимир Иванцивский* [6, f]

[1] Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия
[2] Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), ул. Николаева, 44, г. Владикавказ, 362021, Россия
[3] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан
[4] Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия
[5] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация
[6] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-4150-7428, a.prudnikov@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-7193-0454, info@skgmi-gtu.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-7829-0958, absadykov@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-0863-7490, guzel@mtw.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-5920-8688, lena_tsyganko@mail.ru; [f] https://orcid.org/0000-0001-9244-225X, ivancivskij@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.785.6:669.14.018.24:620.17

История статьи:
Поступила: 06 декабря 2024
Рецензирование: 30 декабря 2024
Принята к печати: 23 января 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Сталь 10
Деформационная термоциклическая обработка (ДТЦО)
Нормализация
Механические свойства
Прочность
Пластичность
Горячекатаная сталь
Относительное удлинение
Относительное сужение
Оптимальный режим
Термомеханическая обработка
Феррито-перлитная структура
Ковка

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье исследуется влияние деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) и последующей нормализации на механические свойства и микроструктуру низкоуглеродистой стали марки 10. Низкоуглеродистые стали широко применяются в машиностроении благодаря высокой пластичности, однако традиционные методы термической обработки слабо влияют на их прочность. Сталь марки 10, с несколько повышенным содержанием углерода, более восприимчива к термообработке, что позволяет оптимизировать соотношение прочности и пластичности. **Цель работы:** определить оптимальные параметры ДТЦО и нормализации для достижения наилучшего сочетания механических свойств листовой стали марки 10. **В работе исследованы** образцы стали 10, произведенной на ОАО «НКМК». **Методы исследования.** Анализ химического состава выполнялся с использованием эмиссионного спектрометра ARL 4460. Образцы подвергались циклической ковке (ДТЦО) на гидравлическом прессе, а затем прокатке до толщины 3 мм. Механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и сужение) определялись на испытательной машине Instron 3369. **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что ДТЦО приводит к измельчению зерна и снижению текстуры, что улучшает пластичность. Оптимальная температура нормализации составляет 900 °C, она обеспечивает наилучшее соотношение прочности и пластичности как для традиционно обработанной, так и для обработанной ДТЦО стали. При этом ДТЦО незначительно повышает прочность, но существенно увеличивает относительное удлинение (на 15 %) и относительное сужение (на 11 %). Последующая нормализация стали, подвергнутой ДТЦО, значительно повышает пластичность (более чем на 50 %) при умеренном снижении прочности. Полученные данные позволяют оптимизировать технологический процесс для достижения желаемого баланса свойств.

Для цитирования: Влияние деформационной термоциклической обработки и нормализации на механические свойства листовой стали 10 / А.Н. Прудников, С.В. Галачиева, Б.Н. Абсадыков, Г.Х. Шарипзянова, Е.Н. Цыганко, В.В. Иванцивский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 192–202. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-192-202.

***Адрес для переписки**
Прудников Александр Николаевич, д.т.н., профессор
Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42,
654007, г. Новокузнецк, Россия
Тел.: +7 3843 74-89-93, **e-mail:** a.prudnikov@mail.ru

Введение

Низкоуглеродистые стали, например марок 05, 08 и 10 по ГОСТ 1050, являются предпочтительным конструкционным материалом в широком диапазоне температур от –40 до +450 °С благодаря своим превосходным пластическим свойствам. Эта группа сталей характеризуется отличной свариваемостью, устойчивостью к образованию флокенов и отсутствием отпускной хрупкости в процессе эксплуатации. Высокая пластичность делает эти стали незаменимыми при изготовлении деталей и узлов машин, требующих значительных пластических деформаций (например, при холодной штамповке, высадке, гибке и других видах обработки давлением). При этом следует отметить, что указанные стали обычно применяются для деталей и узлов с умеренными статическими нагрузками в условиях эксплуатации [1–3].

В обычной металлообработке низкоуглеродистые стали из-за низкого содержания в них углерода традиционно не подвергаются интенсивной термической обработке для повышения прочности. Это связано с тем, что стандартные методы термической обработки, такие как закалка и отпуск, оказывают незначительный эффект на прочностные характеристики таких сталей. Причина этого заключается в ограниченных возможностях изменения микроструктуры стали с низким содержанием легирующих элементов и углерода. Повышение прочности зачастую сопровождается существенным снижением пластичности, что делает подобный подход нецелесообразным для большинства применений. Низкоуглеродистые стали ценятся прежде всего за свою высокую пластичность и свариваемость, необходимые для различных методов обработки давлением [4, 5].

Однако сталь 10, содержащая немного больше углерода (0,07–0,14 %), представляет собой исключение из этого правила. Небольшое, но достаточное повышение содержания углерода открывает возможности для применения более эффективных методов термической обработки. Нормализация, закалка с высоким отпуском и отжиг оказывают заметное влияние на микроструктуру стали 10, приводя к более тонкому и равномерному распределению карбидов и, как следствие, к улучшению механических свойств [6]. Эти методы позволяют регулировать баланс между прочностью и пластичностью, подбирая оптимальный режим обработки для конкретных условий эксплуатации. Применение этих методов позволяет получить сталь с улучшенными характеристиками прочности, не жертвуя существенно ее пластичностью [7–9].

Для дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик стали 10, в частности для достижения более высокого уровня прочности и устойчивости к усталостному разрушению, перспективным направлением является применение деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) в сочетании с последующей термической обработкой. ДТЦО, представляющая собой циклическое воздействие высоких температур и пластической деформации, позволяет добиться более тонкой и измельченной микроструктуры, уменьшить внутренние напряжения и улучшить равномерность свойств по сечению изделия [11–14]. Комбинирование ДТЦО с последующей нормализацией или закалкой с высоким отпуском позволяет получить сталь со значительно улучшенными механическими свойствами, оптимизированными для конкретных условий работы, что расширяет область применения низкоуглеродистых сталей.

Исследования [1–10] свидетельствуют о положительном влиянии ДТЦО не только на механические характеристики, но и на широкий спектр свойств материалов. Данный метод оказывает позитивный эффект на физические, технологические и эксплуатационные свойства разнообразных материалов, начиная от чугунов [15] и включая стали с различным химическим составом [1, 2, 16–18]. Эффективность ДТЦО также подтверждается исследованиями алюминиевых сплавов, в частности заэвтектических силуминов [4–6]. Этот комплексный подход позволяет оптимизировать внутреннюю структуру материала, создавая более благоприятные условия для распределения напряжений и повышения пластичности и прочности.

Механизмы улучшения свойств, достигаемые посредством ДТЦО, представляют собой сложный процесс перераспределения внутренних напряжений и структурных изменений в металле. В результате применение данного метода позволяет существенно повысить прочность, пластичность, коррозионную стойкость и долго-

вечность изделий. Использование ДТЦО в сочетании с последующей термической обработкой открывает новые перспективы для оптимизации свойств сталей, особенно при необходимости достижения баланса прочностных и пластических характеристик [19–20]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на выявление оптимальных режимов ДТЦО для достижения максимального эффекта, а также на конкретизацию влияния различных параметров обработки на структуру и механические свойства стали марки 10. Необходимо учитывать влияние ДТЦО и на другие эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость и усталостная прочность. В связи с этим было проведено исследование, направленное на изучение влияния режима ДТЦО, включающего в себя термоциклическую деформацию (ковку) при температуре выше точки АС3, а также влияния последующей нормализации на механические свойства листовой стали марки 10.

Цель работы заключалась в определении оптимальных параметров ДТЦО для достижения максимального улучшения механических характеристик стали 10, что позволит расширить область ее применения и создать более надежные и долговечные машиностроительные изделия. Для достижения поставленной цели было решено несколько ***задач***, таких как изготовление образцов и проведение механических испытаний, а также проведен анализ изменений механических свойств стали под воздействием ДТЦО. Полученные результаты позволят обоснованно применять ДТЦО для улучшения свойств листовой стали марки 10 и других низкоуглеродистых сталей.

Методы и материалы

В качестве исходного материала для исследования была выбрана сталь 10, произведенная на Новокузнецком металлургическом комбинате (ОАО «НКМК»). Выбор данной марки стали обусловлен ее широким применением в машиностроении и относительно невысокой стоимостью, что делает ее привлекательным объектом для изучения влияния различных методов обработки на механические и микроструктурные свойства. Для точного определения химического состава исследуемой стали был использован современный метод спектрального анализа. В частности, для определения количественного содержания различных элементов в стали применялся эмиссионный спектрометр ARL 4460. Полученные данные о химическом составе стали были использованы для сравнения с данными из литературы и для оценки соответствия химического состава стали заявленным стандартам (см. таблицу).

Химический состав обрабатываемой стали 10
Chemical composition of Steel 10 being treated

Марка стали	Содержание элементов, % (вес.)							
	C	Mn	Si	P	Cr	S	Cu	Ni
10	0,134	0,422	0,226	0,0139	0,048	0,0181	0,198	0,041

В ходе эксперимента, проведенного на ОАО «ЗСМК» (г. Новокузнецк), стальной сляб размером 900×700×500 мм подвергся циклической ковке методом однопроходной протяжки на гидравлическом прессе с усилием 20 МН. Процесс деформации проводился при температуре нагрева 1250 °С с выдержкой сляба в печи в течение двух часов до начала ковки (без учета времени нагрева). Важно отметить, что время выдержки было выбрано для обеспечения равномерного прогрева сляба по всему объему. В процессе эксперимента было осуществлено 10 циклов деформации, что позволило достичь значительного изменения структуры и свойств исходного материала. В результате многократной деформации толщина заготовки после термоциклической ковки (ДТЦО) уменьшилась до 300…310 мм, демонстрируя существенную степень пластической деформации.

После проведения ДТЦО полученные заготовки подверглись дальнейшей обработке прокаткой на ОАО «НМЗ» им. А.Н. Кузьмина (г. Новосибирск). Прокатка производилась в соответствии с промышленным технологическим режимом с целью получения листового материала заданной толщины. В результате процесса

проката были получены листы толщиной 3 мм, обладающие измененными свойствами в сравнении с исходным слябом. Это изменение свойств является следствием комбинированного воздействия деформации и термической обработки, составляющих суть ДТЦО.

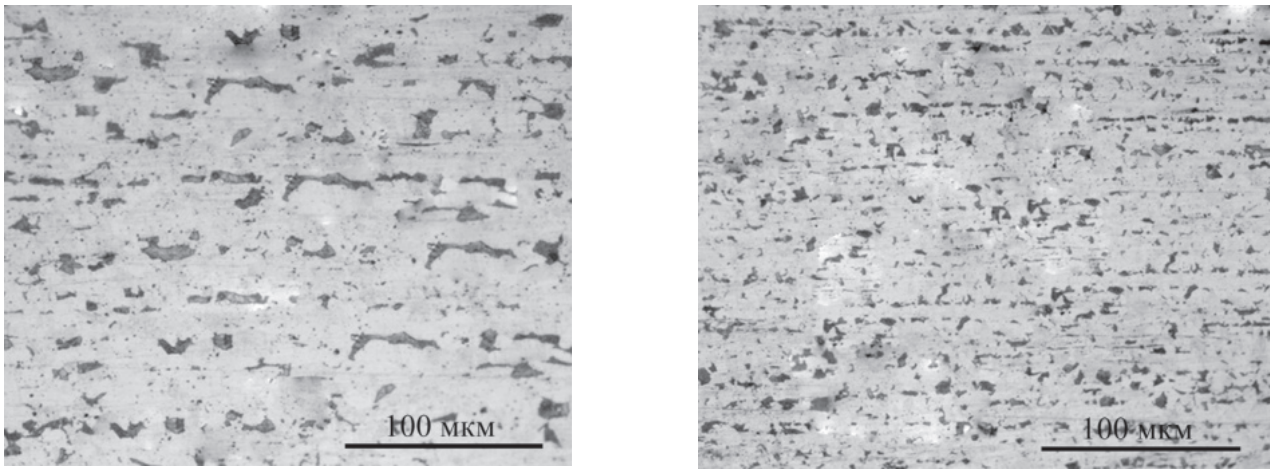
Для всесторонней оценки влияния деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) на свойства листовой стали были проведены комплексные механические испытания полученного материала. Использовались плоские образцы толщиной 3 мм, которые были изготовлены из листовой стали, прошедшей обработку ДТЦО и последующую прокатку. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 3369. В ходе испытаний были определены ключевые механические характеристики полученной листовой стали. К ним относятся временное сопротивление разрыву (предел прочности); предел текучести; относительное удлинение и относительное сужение.

Более подробная информация о технологическом процессе производства листовой стали с применением ДТЦО, включая параметры ковки, режимы нагрева и охлаждения, а также параметры проката, приведены в работе [7].

Результаты и их обсуждение

В предыдущем исследовании [2] было установлено, что применение предварительной термоциклической ковки перед процессом проката листовой стали марки 10 способствует сохранению феррито-перлитной структуры (рис. 1). Важно отметить, что использование предварительной деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) оказывает существенное влияние на морфологию перлитных структур. В частности, наблюдается уменьшение размеров перлитных колоний, снижение их объемной доли и ослабление текстуры, выражающееся в уменьшении степени ориентировки перлитных колоний вдоль направления прокатки. Эти микроструктурные изменения, вызванные ДТЦО, приводят к заметному улучшению механических характеристик.

Более того, результаты исследования [2] показали, что применение ДТЦО перед прокаткой приводит к существенному (почти на 30 %) повышению прочности горячекатаной листовой стали марки 10. Это выражается в увеличении временного сопротивления разрыву с 370 до 478 МПа и предела текучести с 305 до 390 МПа (рис. 1). Следует подчеркнуть, что такое значительное повышение прочности достигается при незначительном, допустимом снижении пластических свойств материала. Применение предварительной деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) демонстрирует значительный потенциал для улучшения механических свойств стали марки 10, что делает этот метод весьма перспективным в промышленном применении. Достигаемое повышение прочности не является случайным следствием обработки,



а *б*

Рис. 1. Микроструктура исследуемых образов из стали 10 (толщина листа 3 мм), полученных с помощью промышленной технологии (*а*) и с помощью термоциклической ковки (*б*)

Fig. 1. Microstructure of the studied samples made of *Steel 10* (sheet thickness 3 mm) obtained using industrial technology (*а*) and using thermal cycling forging (*б*)

а обусловлено фундаментальными изменениями в микроструктуре материала. Эти изменения, в свою очередь, значительно влияют на механизмы деформации и разрушения стали.

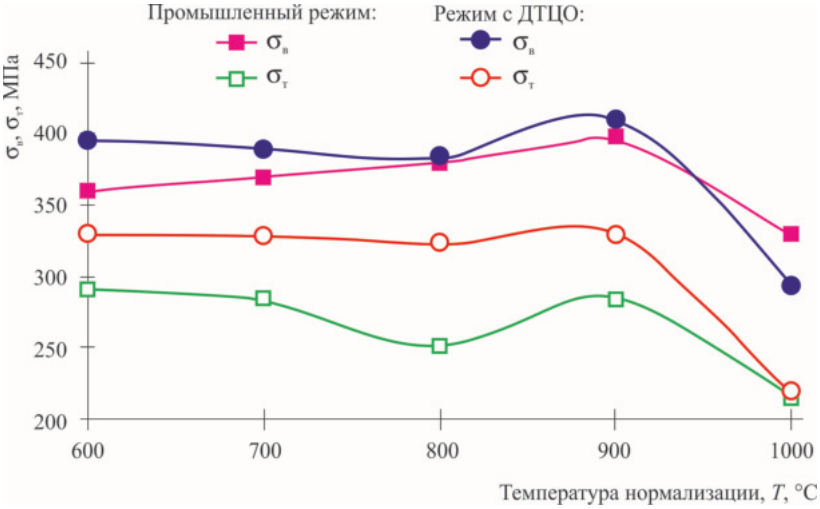
В основе повышения прочности, достигаемого с помощью ДТЦО, лежат два ключевых микроструктурных эффекта. Во-первых, ДТЦО способствует измельчению зеренной структуры стали. Более мелкое зерно означает увеличение площади границ зерен, которые действуют как препятствия для движения дислокаций – основных носителей пластической деформации [2]. Это затрудняет пластическую деформацию и, следовательно, повышает прочность материала. Более мелкое зерно также способствует повышению предела текучести и твердости стали. Во-вторых, ДТЦО эффективно уменьшает текстуру материала. Текстура, или предпочтительная ориентация кристаллитов, часто возникает в процессе обработки металлов давлением и может приводить к анизотропии механических свойств. Уменьшение текстуры, достигаемое с помощью ДТЦО, приводит к более изотропному материалу с более равномерными свойствами во всех направлениях. Это улучшает сопротивляемость стали к деформации и повышает ее надежность в условиях сложного напряженного состояния. Таким образом, сочетание измельчения структуры и уменьшения текстуры, достигаемое за счет ДТЦО, обеспечивает комплексное улучшение механических свойств, значительно увеличивая прочность и сохраняя высокую пластичность стали. Это делает ДТЦО эффективным инструментом для повышения качества и расширения области применения стали 10.

В продолжение этого исследования было изучено влияние температуры нормализации на структуру и механические свойства листовой горячекатаной стали марки 10, изготовленной как по традиционному промышленному режиму, так и с применением ДТЦО. Эксперименты проводились в диапазоне температур нормализации от 600 до 1000 °С с выдержкой при каждой температуре в течение 10 часов. Длительная выдержка обеспечивала достижение термодинамического равновесия при заданной температуре. Результаты исследования показали, что изменение температуры нормализации существенно влияет на микроструктуру стали [2], причем наибольшее влияние оказывает повышение температуры. Было установлено, что с увеличением температуры нормализации до 900 °С происходит заметное измельчение перлитных колоний в структуре стали. Это, в свою очередь, оказывает влияние на механические свойства, что требует дальнейшего изучения корреляций между температурно-временным режимом нормализации и изменением прочностных и пластических свойств. Дополнительные исследования позволят оптимизировать технологический процесс с целью достижения максимального эффекта от применения ДТЦО и последующей нормализации.

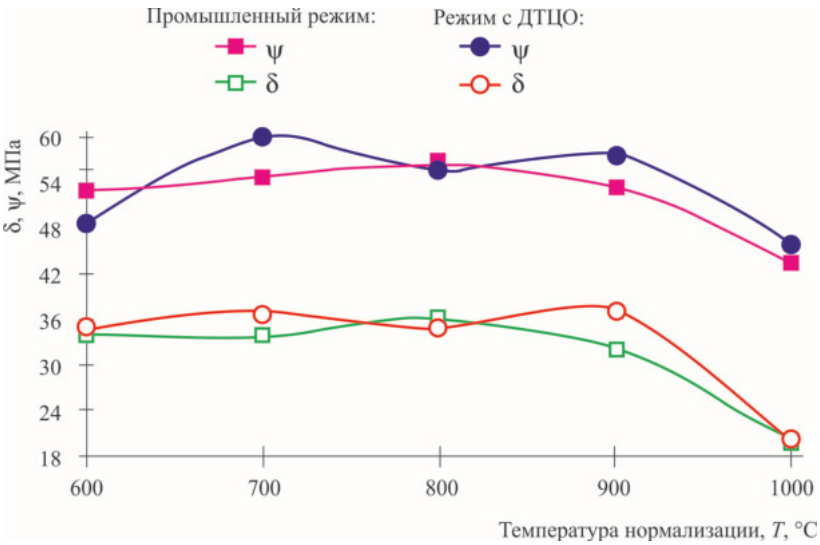
Процесс структурных изменений в стали под воздействием нормализации протекает с различной интенсивностью в зависимости от предварительной обработки. Было установлено, что сталь, подвергнутая предварительной ковке, демонстрирует более активные структурные перестройки при нормализации, чем сталь, не подвергавшаяся ковке. Это связано с более высокой плотностью дислокаций и большей энергией деформации, накопленной в структуре стали после ковки. Структурные дефекты являются зародышевыми центрами для образования новых зерен при высоких температурах нормализации.

Повышение температуры нормализации до 1000 °С приводит к росту размеров зерна и, как следствие, к огрублению структуры стали независимо от того, применялась ли предварительная ДТЦО или нет. Это обусловлено процессами рекристаллизации и роста зерен при высоких температурах. Огрубление структуры сопровождается снижением прочностных характеристик и увеличением пластичности материала. Таким образом, существует оптимальная температура нормализации, при которой достигается наилучшее сочетание прочностных и пластических свойств.

Анализ полученных результатов (рис. 2, *а*, *б*), демонстрирующих влияние температуры нормализации на свойства горячекатаной стали марки 10, выявил оптимальную температуру для этого процесса: 900 °С. При такой температуре достигается наиболее благоприятное сочетание прочностных и пластических характеристик как для стали, произведенной по стандартной технологии, так и для стали, предварительно подвергнутой деформационной термоциклической обработке. Примечательно, что использование ДТЦО не приводит к существенному росту прочностных показателей по сравнению с тра-



а



б

Рис. 2. Влияние температуры нормализации (время 10 ч) на механические характеристики листовой горячекатаной стали 10, изготовленной по промышленному режиму и с использованием ДТЦО:

а – $\sigma_в$, $\sigma_т$; *б* – δ, ψ

Fig. 2. Influence of normalizing temperature (duration 10 hours) on the mechanical properties of hot-rolled *Steel 10* sheet, manufactured according to the industrial mode and using *DCT*:

а – σ_u, σ_y; *б* – δ, ψ

диционной горячекатаной сталью. Однако отмечается значительный прирост пластичности. Конкретно наблюдается повышение относительного удлинения приблизительно на 15 % и относительного сужения на 11 % при использовании ДТЦО. Такие существенные улучшения пластических характеристик наглядно демонстрируют потенциал ДТЦО в качестве метода повышения пластичности стали без значительного ухудшения прочности. Это важный результат, так как многие технологические процессы, например холодная штамповка или глубокая вытяжка, требуют высокой пластичности материала без существенного уменьшения прочности.

Полученные данные позволяют предположить, что ДТЦО изменяет микроструктуру стали таким образом, что увеличивает ее способность к пластической деформации. Это, вероятно, связано с уменьшением внутренних напряжений и перераспределением фазового состава стали,

что обеспечивает более равномерное распределение деформации по объему материала. В целом результаты исследования подтверждают целесообразность применения ДТЦО в сочетании с нормализацией для получения листовой стали марки 10 с улучшенным балансом прочностных и пластических свойств, особенно если конечный продукт должен обладать высокой пластичностью.

Последующая нормализация стали, предварительно обработанной методом ДТЦО, вызывает существенные изменения ее свойств. Наблюдается снижение прочностных характеристик примерно на 15 %, что указывает на уменьшение сопротивления деформации. Параллельно с этим пластичность стали значительно возрастает – более чем на 50 % по сравнению с исходным горячекатаным состоянием. Такое изменение свойств объясняется микроструктурными перестройками, происходящими в процессе нормализации после ДТЦО. Дополнительная термическая обработка приводит к дальнейшему измельчению кристаллической структуры, что, в свою очередь, снижает прочность, но значительно повышает пластичность. Кроме того, процесс нормализации эффективно снимает остаточные напряжения, накопленные в стали в процессе ДТЦО. Снятие этих напряжений способствует улучшению пластичности, делая материал более податливым к дальнейшей обработке давлением. Таким образом, комбинированное воздействие ДТЦО и нормализации позволяет получить высокопластичный материал, что может быть особенно ценно при производстве деталей, требующих значительных пластических деформаций. Значительное повышение пластичности может быть особенно важным в тех случаях, когда требуются высокие показатели пластической деформации при обработке металла давлением. Следовательно, выбор оптимальной температуры нормализации и предварительной обработки (ДТЦО) позволяет целенаправленно регулировать соотношение прочности и пластичности стали марки 10 в соответствии с требованиями конкретного применения.

Тщательный анализ полученных данных о механических свойствах, сопоставленный с данными о технологическом процессе, позволил определить оптимальные параметры ДТЦО, обеспечивающие достижение требуемых механических характеристик конечного продукта. Это включает в себя не только выбор оптимальных параметров ковки, таких как температура и степень деформации, но и оптимизацию режимов последующей термической обработки, чтобы обеспечить наилучшее сочетание прочности, пластичности, ударной вязкости и других необходимых свойств для конкретных условий эксплуатации изделий из данной стали. На основе полученных результатов возможно разработать рекомендации для промышленного внедрения ДТЦО с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик листовой стали марки 10.

Выводы

Проведенное исследование показало, что применение деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) в сочетании с последующей нормализацией позволяет эффективно управлять механическими свойствами листовой стали марки 10, расширяя тем самым область ее применения.

Предварительная ДТЦО, несмотря на незначительное повышение прочности (примерно 30 %), приводит к значительному увеличению пластичности горячекатаной стали марки 10. Относительное удлинение и относительное сужение возрастают приблизительно на 15 и 11 % соответственно. Это делает ДТЦО перспективным методом для получения стали с улучшенным сочетанием прочности и пластичности, особенно важных для процессов холодной обработки давлением.

Данное исследование подтверждает высокую эффективность применения ДТЦО как метода предварительной обработки листовой стали марки 10 перед последующей нормализацией. Комбинированное воздействие этих методов позволяет достичь значительного улучшения пластических свойств при сохранении приемлемых прочностных характеристик. Полученные результаты открывают новые возможности для оптимизации технологического процесса производства листовой стали марки 10, расширяя диапазон ее применения в машиностроении и других отраслях.

Список литературы

1. *Prudnikov A.N., Prudnikov V.A.* Hardening low carbon steel 10 by using of thermalcyclic deformation and subseauent heat treatment // Materials Science.

Noneguilibrium Pahse Transformations. – 2016. – Vol. 2 (4). – P. 10–13.

2. *Prudnikov A.N., Popova M., Prudnikov V.A.* Influence of thermal-cyclic deformation and hardening heat treatment on the structure and properties of steel 10 // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 187–193. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.187.

3. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole / M.V. Konstantinova, A.A. Olentsevich, V.Y. Konyukhov, E.A. Guseva, V.A. Olentsevich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1064 (1). – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012020.

4. *Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V.* 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.

5. *Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A.* Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2032 (1). – P. 012071. – DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012071.

6. Research and analysis of the low-temperature potential of heat networks / A.G. Batukhtin, M.V. Kobylkin, Y.O. Rikker, S.G. Batukhtin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 791 (1). – P. 012039. – DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012039.

7. *Martyushev N.V., Petrenko Y.N.* 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.

8. *Martyushev N.V.* Alignment of the microstructure of castings from the heterophase lead bronzes // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 163–167. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.163.

9. The influence of non-vacuum electron-beam facing on the structure of Ti–Ta layers formed on the surface of VT1-0 alloy / V.V. Samoylenko, O.G. Lenivtseva, I.A. Polyakov, I.S. Laptev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 124 (1). – P. 012117. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012117.

10. *Тамаурова Э.В.* Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства углеродистых сталей // Металлы. – 2002. – № 1. – С. 82–87.

11. *Plotnikova N.V., Skeeba V.Y.* Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

12. *Nekrasova T.V., Melnikov A.G., Martyushev N.V.* 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.

13. *Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V.* Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

14. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants / A.G. Batukhtin, E.A. Makhov, M.S. Bass, S.G. Batukhtin // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2023. – Vol. 15 (57). – P. 351–361.

15. *Konyukhov V.Y., Permyakova D.N., Oparina T.A.* Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012046.

16. *Batukhtin A.* Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9 (7). – P. 1300–1320.

17. Green building as a tool of energy saving / A.M. Gladkih, V.Yu. Konyuhov, I.I. Galyautdinov, E.I. Shchadova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 350. – P. 012032.

18. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods / V.Yu. Konyuhov, A.M. Gladkih, I.I. Galyautdinov, E.I. Shchadova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 760. – P. 012027.

19. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, M.V. Grechneva, V.V. Kondrat'ev, A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – P. 012012.

20. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production / V.V. Kondrat'ev, V.A. Ershov, S.G. Shakhrai, N.A. Ivanov, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60 (7–8). – P. 877–882.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 192–202
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-192-202

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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

Effect of deformation thermocyclic treatment and normalizing on the mechanical properties of sheet Steel 10

Alexander Prudnikov [1, a, *], *Svetlana Galachieva* [2, b], *Bakhyt Absadykov* [3, c], *Guzel Sharipzyanova* [4, d], *Elena Tsyganko* [5, e], *Vladimir Ivancivsky* [6, f]

[1] Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation
[2] North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaev str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation
[3] K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, 2 Satbaev st., Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan
[4] Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation
[5] Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation
[6] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-4150-7428, a.prudnikov@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-7193-0454, info@skgmi-gtu.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-7829-0958, absadykov@mail.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-0863-7490, guzel@mtw.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-5920-8688, lena_tsyganko@mail.ru; [f] https://orcid.org/0000-0001-9244-225X, ivancivskij@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 06 December 2024
Revised: 30 December 2024
Accepted: 23 January 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Steel 10
Deformation thermocyclic treatment (*DCT*)
Normalization
Mechanical properties
Strength
Plasticity
Hot-rolled steel
Elongation
Reduction of area
Optimal mode
Thermomechanical treatment
Ferrite-pearlite structure
Forging

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. This paper investigates the influence of deformation thermocyclic treatment (*DCT*) and subsequent normalizing on the mechanical properties and microstructure of low-carbon *Steel 10*. Low-carbon steels are widely used in engineering due to its high ductility; however, traditional heat treatment methods have a limited effect on its strength. *Steel 10*, with slightly increased carbon content, is more susceptible to heat treatment, which allows for optimizing the balance between strength and ductility. **The purpose of the work** is to determine the optimal parameters of *DCT* and normalizing for achieving the best combination of mechanical properties of sheet steel *Steel 10*. In this work, *Steel 10* samples, produced by OJSC "NKMC", were studied. **The methods of investigation** include the analysis of the chemical composition using an emission spectrometer *ARL 4460*. Samples were subjected to cyclic forging (DCT) on a hydraulic press, followed by rolling to a thickness of 3 mm. Mechanical properties (tensile strength, yield strength, elongation, and reduction of area) were determined using a testing machine *Instron 3369*. **Results and Discussion.** The results showed that *DCT* leads to grain refinement and texture reduction, which improves ductility. The optimal normalizing temperature is 900°C, providing the best combination of strength and ductility for both conventionally treated and *DCT*-treated steel. At the same time, *DCT* slightly increases the strength but significantly increases the elongation (by 15 %) and the reduction of area (by 11%). Subsequent normalizing of the *DCT*-steel significantly increases ductility (by more than 50 %) and reduces strength. The data obtained allow for optimizing the technological process to achieve the desired balance of properties.

For citation: Prudnikov A.N., Galachieva S.V., Absadykov B.N., Sharipzyanova G.Kh., Tsyganko E.N., Ivancivsky V.V. Effect of deformation thermocyclic treatment and normalizing on the mechanical properties of sheet Steel 10. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 192–202. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-192-202. (In Russian).

*** Corresponding author**
Prudnikov Alexander N., D.Sc. (Engineering), Professor
Siberian State Industrial University,
42 Kirov st.,
654007, Novokuznetsk, Russian Federation
Tel.: +7 3843 74-89-93, **e-mail:** a.prudnikov@mail.ru

References

1. Prudnikov A.N., Prudnikov V.A. Hardening low carbon steel 10 by using of thermalcyclic deformation and subseauent heat treatment. *Materials Science. Noneguilibrium Pahse Transformations*, 2016, vol. 2 (4), pp. 10–13.

2. Prudnikov A.N., Popova M., Prudnikov V.A. Influence of thermal-cyclic deformation and hardening heat treatment on the structure and properties of steel 10. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 187–193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.187.

3. Konstantinova M.V., Olentsevich A.A., Konyukhov V.Y., Guseva E.A., Olentsevich V.A. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1064 (1), p. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012020.

4. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. 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.

5. Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2032 (1), p. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012071.

6. Batukhtin A.G., Kobylkin M.V., Rikker Y.O., Batukhtin S.G. Research and analysis of the low-temperature potential of heat networks. IO*P Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 791 (1), p. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012039.

7. Martyushev N.V., Petrenko Y.N. 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.

8. Martyushev N.V. Alignment of the microstructure of castings from the heterophase lead bronzes. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 163–167. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.163.

9. Samoylenko V.V., Lenivtseva O.G., Polyakov I.A., Laptev I.S. The influence of non-vacuum electron-beam facing on the structure of Ti–Ta layers formed on the surface of VT1-0 alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Eng*ineering, 2016, vol. 124 (1), p. 012117. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012117.

10. Tataurova E.V. Vliyanie termotsiklicheskoi obrabotki na strukturu i svoistva uglerodistykh stalei [Effect of thermocycling on structure and properties of carbon steels]. *Metally = Metals*, 2002, no. 1, pp. 82–87.

11. Plotnikova N.V., Skeeba V.Y. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

12. Nekrasova T.V., Melnikov A.G., Martyushev N.V. 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.

13. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. 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. Batukhtin A.G., Makhov E.A., Bass M.S., Batukhtin S.G. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2023, vol. 15 (57), pp. 351–361.

15. Konyukhov V.Y., Permyakova D.N., Oparina T.A. Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012046.

16. Batukhtin A. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9 (7), pp. 1300–1320.

17. Gladkih A.M., Konyuhov V.Yu., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Green building as a tool of energy saving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 350, p. 012032.

18. Konyuhov V.Yu., Gladkih A.M., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 760, p. 012027.

19. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Grechneva M.V., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411, p. 012012.

20. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production. *Metallurgist*, 2016, vol. 60 (7–8), pp. 877–882.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

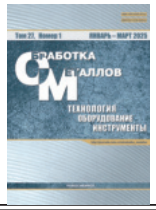
© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 203–217
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-203-217

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование поведения в условиях изнашивания полифениленсульфидных (PPS) композиционных материалов, армированных стекловолокном и органической глиной

Вишавджит Бханавасе [a], ***Бхагван Джоги*** [b, *], ***Йогирадж Дама*** [c]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-2268-2693, vlbhanavase@sinhgad.edu; [b] https://orcid.org/0000-0003-2099-7533, bfjogi@dbatu.ac.in;
[c] https://orcid.org/0009-0008-5404-4347, yogirajdama@dbatu.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678.8

История статьи:
Поступила: 10 января 2025
Рецензирование: 23 января 2025
Принята к печати: 03 февраля 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Полифениленсульфид (PPS)
Стекловолокно
Бентонитовая глина
Трение и износ
Трибологические испытания по схеме «стержень – диск»
Метод Тагучи
Износостойкость

АННОТАЦИЯ

Введение. В данном исследовании изучается влияние ключевых рабочих параметров (нагрузки, скорости скольжения и пути скольжения) на поведение в условиях изнашивания композиционных материалов, изготовленных из 40 % стекловолокна и полифениленсульфида (PPS) с различным процентным содержанием бентонитовой глины по весу. Основная **цель работы** заключалась в оценке того, как различные экспериментальные условия влияют на характеристики изнашивания. Для достижения этой цели проводили эксперименты с использованием ортогональной матрицы L9 в соответствии с методом Тагучи при трех уровнях сложности. Трибологические испытания выполняли на установке, которая реализует схему трения «стержень – диск» в соответствии со стандартами ASTM G99 с шестью образцами материалов, содержащими различные процентные доли бентонитовой глины. Результаты показывают, что износ исходного образца увеличивается с ростом приложенной средней нагрузки. В отличие от этого образцы, содержащие бентонитовую глину, демонстрируют уменьшение износа с увеличением средней нагрузки. Кроме того, увеличение содержания бентонитовой глины приводит к значительному уменьшению износа, но дальнейшее увеличение до 7 % глины приводит к заметному увеличению износа. **Методы исследования.** В этом исследовании изучено влияние нагрузки, скорости скольжения и весовой доли бентонитовой глины на износ и коэффициент трения (COF) композиционного материала. Композиционные образцы с различным содержанием глины были испытаны с использованием установки, реализующей схему трения «стержень – диск», а износ и коэффициент трения измерялись как зависимые параметры. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) использовалась для анализа поверхностей износа после испытаний, чтобы определить влияние независимых параметров на механизмы изнашивания и морфологию поверхности. Результаты выявили важные направления в характере трения и изнашивания при различных условиях. Сравнительный анализ дал представление об оптимизации трибологических характеристик материала путем балансировки нагрузки, скорости и содержания глины. **Результаты и обсуждение.** В данном исследовании изучено влияние добавления бентонитовой глины на износостойкость композитов PPS + GF (полифениленсульфид + стекловолокно). Полученные данные показывают, что износ снижается до 3 % при первоначальном увеличении процентного содержания бентонитовой глины по весу, но вновь возрастает при дальнейшем увеличении содержания глины. Отмечено, что более высокое процентное содержание бентонитовой глины по весу приводит к увеличению удельной скорости изнашивания и снижению коэффициента трения из-за проявления абразивного механизма изнашивания, вызванного агломерацией глины. Наоборот, более низкое процентное содержание бентонитовой глины по весу способствует снижению скорости изнашивания, увеличивая при этом коэффициент трения. Эта работа направлена на решение двойной задачи: оптимизации характеристик и снижения себестоимости материалов, используемых в условиях трения и износа. **Обоснование актуальности исследования.** Цель этого исследования – разработать органический полимерный композиционный материал, обладающий улучшенными характеристиками и конкурентоспособный с точки зрения затрат и прибыли. Одной из ключевых задач является создание такого композиционного материала с использованием бентонитовой глины – органического и легкодоступного материала, который можно приобрести по низкой цене. Это позволит производить композит по конкурентоспособной цене без ущерба для качества. Другой целью исследования является замена существующих фрикционных материалов в тормозных системах и муфтах новым разработанным композитом, что потенциально улучшит их характеристики и долговечность. Помимо этого, работа направлена на создание композиционного материала, пригодного для использования в подшипниках скольжения, особенно работающих в агрессивных средах. Такой композит должен обладать повышенной устойчивостью к химическому разрушению, обеспечивая увеличенный срок службы и надежность в тяжелых условиях эксплуатации.

Для цитирования: *Бханавасе В., Джоги Б.Ф., Дама Й.Б.* Исследование поведения в условиях изнашивания полифениленсульфидных (PPS) композиционных материалов, армированных стекловолокном и органической глиной // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 203–217. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-203-217.

Аббревиатуры

PPS – полифениленсульфид;
GF – стекловолокно;
COF – коэффициент трения;
SEM – сканирующая электронная микроскопия;
FRP – волоконно-армированный полимер;
MMT – монтмориллонит;
POM – полиоксиметилен;
PTFE – политетрафторэтилен;
EDS – энергодисперсионная спектроскопия;
HRC – твердость по Роквеллу, шкала С;
OMMT – органически модифицированный монтмориллонит;
SAXS – малоугловое рассеяние рентгеновских лучей.

***Адрес для переписки**
Джоги Бхагван Фатру, профессор
Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара,
Лонере, Райгад,
402103, Махараштра, Индия
Тел.: +91 942-116-6370, **e-mail:** bfjogi@dbatu.ac.in

Введение

Проблема загрязнения, связанного с выбросами частиц износа керамических, полуметаллических и металлических рабочих поверхностей тормозных механизмов, стимулировала исследования по их замене на альтернативные материалы на основе натуральных волокон, таких как лен, конопля и сизаль. Эти органические волокна отличаются экономичностью, биоразлагаемостью и малым весом. В то же время синтетические волоконно-армированные полимерные композиты (FRP) находят широкое применение в различных инженерных областях, включая аэрокосмическую, автомобильную и строительную промышленность, благодаря своим высоким удельным характеристикам (модулю упругости и прочности), биоразлагаемости (в отдельных случаях), коррозионной стойкости и длительному сроку службы.

Ключевую роль в определении свойств FRP-композитов играет межфазная граница волокно-матрица, через которую происходит передача напряжений сдвига от матрицы к армирующему волокну, влияя как на кратковременные, так и на долговременные характеристики материала. В данной работе представлен обзор структуры и свойств межфазной границы волокно-матрица [1–3]. Показано, что характеристики межфазной границы между армирующим волокном и полимерной матрицей оказывают значительное влияние на механические и трибологические свойства композита.

На примере композита GFF/PPS (стекловолокно/полифениленсульфид) продемонстрировано, что оптимальный состав, содержащий 80 масс. % GFF (~70 об. %), обеспечивает наилучшие механические свойства и смачиваемость. Высокие механические характеристики PPS-композитов с ультравысоким содержанием стекловолокна обусловлены увеличенной толщиной межфазного слоя и эффектом взаимозацепления волокон.

В контексте экологичности использование биоразлагаемых армирующих волокон, таких как глина, может вызывать вопросы применительно к композитам на основе углеродного волокна / глины / POM (полиоксиметилен). Эксперименты, направленные на изучение механических и трибологических свойств таких композитов, показали, что добавление глины способствует увеличению модуля упругости при растяжении и прочности. Установлено, что введение углеродного волокна в POM-композиты улучшает их механические свойства и износостойкость. Композит на основе углеродного волокна, глины и POM продемонстрировал минимальные значения удельной скорости изнашивания и коэффициента трения. Полимерные композиты, модифицированные наноглиной, характеризуются повышенными механическими свойствами, такими как прочность на растяжение, предел текучести, модуль упругости, вязкость разрушения и усталостная прочность, по сравнению с немодифицированными полимерами. Тем не менее данные об износостойкости и поверхностных механических свойствах таких материалов (твердость и устойчивость к царапинам) остаются ограниченными. Показано, что оптимизация содержания (масс. %) наноглины способствует улучшению межфазного взаимодействия между волокном, полимерной матрицей и наноглиной, что открывает перспективы для повышения эффективности применения нанокомпозитов в конструкционных элементах [4–6].

Для оценки трибологических характеристик композиционных материалов были определены скорость изнашивания и коэффициент трения. Экспериментальные исследования показали, что полимерные композиты, содержащие углеродные волокна, графит, политетрафторэтилен в полифениленсульфидной матрице, демонстрируют хорошие показатели износостойкости в рабочих условиях. Отмечено, что обработка поверхности монтмориллонитовой (ММТ) глины приводит к улучшению ее адгезии и взаимодействия с армирующими компонентами, что положительно сказывается на прочностных характеристиках композитов (на растяжение и изгиб) и дополняет функциональность, обеспечиваемую натуральными волокнами. Модификация поверхности придает гидрофильной ММТ гидрофобные свойства, повышая ее совместимость с органической полимерной матрицей.

Следует отметить, что межфазное взаимодействие между матрицей и армирующими волокнами глины оказывает существенное влияние на процесс формирования локальных деформаций (что было подтверждено методом цифровой корреляции изображений), а также на процессы за-

рождения и распространения повреждений в образцах из углеродного волокна, армированного полифениленсульфидом (5HS), при испытаниях на растяжение под углами ±45° и 0°. Межфазная адгезия оказывает существенное влияние на характер разрушения: образцы с прочной межфазной связью демонстрируют когезионный тип разрушения, в то время как образцы со слабой межфазной связью характеризуются интенсивным расслоением [7–9].

Помимо границы раздела, на трибологические характеристики влияет частота движения: коэффициент трения снижается с ее увеличением. Напротив, увеличение пройденного пути скольжения приводит к увеличению коэффициента трения. Типичная нагрузка не оказывает существенного влияния на изнашивание. Зависимость износа от пройденного расстояния имеет сложный характер: сначала он уменьшается, а затем увеличивается. Таким образом, коэффициент трения и интенсивность износа зависят от нагрузки и частоты возвратно-поступательного движения. Сетчатая структура диспергированных силикатных слоев в нанокомпозитах, а следовательно, и вязкостные свойства нанокомпозитов в значительной степени определяются концентрацией введенных волокон OMMT [10–12]. В данной работе представлен новый метод малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (SAXS) для анализа степени дисперсии силикатных слоев в полимерной матрице. Результаты SAXS и STEM показали, что содержание OMMT в количестве 5 % по массе является пороговым, инициирующим формирование прочной флокулированной структуры диспергированных силикатных слоев. Дальнейшее увеличение концентрации OMMT существенно изменяет вязкостные свойства нанокомпозита, содержащего OMMT в количестве 5 % по массе [13].

Композитное покрытие из армированного углеродным волокном PPS, нанесенное на нержавеющую сталь и работающее в условиях водяной смазки, демонстрирует значительно более высокую износостойкость, чем при сухом трении [14–15]. Трибологическое поведение композиционного покрытия в условиях водяной смазки зависит как от скорости скольжения, так и от нагрузки. При низкой скорости (0,43 м/с) наблюдается устойчивый рост трения, который с увеличением нагрузки сменяется его постепенным снижением. Влияние скорости скольжения на скорость износа композитного покрытия менее выражено, чем влияние нагрузки на коэффициент трения, который быстро возрастает под давлением. Коэффициент трения постепенно увеличивается с ростом нагрузки; при высоких скоростях (0,86 м/с) этот эффект усиливается [16–18].

Исследование влияния сухой и водяной смазки на трибологические характеристики покрытий из полифениленсульфида, армированного углеродным волокном, показывает, что колебания коэффициента трения во времени более стабильны при использовании водяной смазки, чем при сухом трении. Композитное покрытие, работающее в условиях водяной смазки, демонстрирует более высокую износостойкость, чем в условиях сухого трения. В исследованиях [19–20] представлены данные, посвященные изучению трибологических и механических свойств композиционного материала, состоящего из 70 % полиамида-66 (PA66) и 30 % полифениленсульфида (PPS), модифицированного различным содержанием политетрафторэтилена (PTFE).

Авторы выражают искреннюю благодарность кафедре машиностроения Технологического университета им. доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере; компании D. N. Polymers, Чинчвад; Институту информационных технологий Вишвакарма, Кондхва, Пуна; DUTECH India Laboratories, Пуна; Научно-исследовательскому институту Агаркара, Пуна, за поддержку и неоценимый вклад в данную работу. Авторы также признательны перечисленным организациям за вклад в проведение исследования.

Экспериментальная часть

Анализ показал, что добавление PTFE в смесь PA66/PPS негативно влияет на свойства последней, однако существенно снижает коэффициент трения и повышает износостойкость. Композит на основе PPS с 40 % стекловолокна и добавками бентонитовой глины различной концентрации, полученный методом термокомпрессии, является в определенной степени экологически чистым. В рамках данного исследования изучалось влияние нагрузки, скорости скольжения и состава на трибологические характеристики PPS, армированного 40 % стекловолокна и содержащего различные концентрации глины. Результаты показывают, что увеличение содержания глини-

стых частиц и их равномерное распределение в матрице PPS способствует накоплению продуктов износа. Эти продукты образуются в результате адгезионного износа на границе контакта между поверхностью композита и неровностями (выступами) на стальном диске, играющими роль абразивных частиц. Трибологическое поведение этих продуктов износа определяется относительной высотой выступов на поверхности стального контртела. Было установлено, что минимальный коэффициент трения соответствует композиту, не содержащему глины. Введение 2 % глины приводит к росту коэффициента трения, тогда как дальнейшее увеличение до 5 % вызывает снижение коэффициента трения. Подробная информация о составе исследованных материалов представлена в табл. 1.

Бентонитовая глина (алюмосиликат) – это распространенный компонент, используемый в сочетании с PPS и 40 % стекловолокна для создания экологически безопасного PPS-композита. Испытания на изнашивание проводили на машине трения DUCOM TR-20-M26 по схеме «стержень – диск», обеспечивающей непрерывный контакт между образцом (стержнем) и вращающимся диском. В экспериментах использовали цилиндрический стержень высотой 40 мм и диаметром 10 мм, контактирующий с плоской поверхностью стального диска диаметром 300 мм и толщиной 12 мм. Материалом для изготовления дисков служила сталь марки 41MoCr11 с твердостью в диапазоне 55…58 HRC. Стальные стержни были изготовлены из композиционного материала с тщательно подобранным составом. Перед каждым испытанием поверхность стержня и диска очищали. Каждое испытание повторяли пять раз с использованием новых стержней и дисков при сохранении неизменных параметров. Испытания проводили в условиях сухого трения для поддержания постоянной температуры на протяжении расстояния скольжения 33 085,26 м. В экспериментах использовали три скорости скольжения: 2,0423 м/с, 4,0846 м/с и 6,1269 м/с, а также три уровня контактной нагрузки между стержнем и диском. Значения параметров испытаний для каждого уровня представлены в табл. 2. Экспериментальный план был разработан в соответствии с ортогональной матрицей L9 по методу Тагучи, что предполагало проведение девяти испытаний для каждого состава материала.

Целью данного исследования являлось определение скорости изнашивания и коэффициента трения шести различных композитов на основе PPS с 40 % стекловолокна и разным содержанием глины. Материалы были предоставлены

Таблица 1
Table 1

Материалы и методика
Materials and Method

№ п/п	Образец	PPS, вес. %	GF, вес. %	Глина, вес. %
1	PGB0	62	30	0
2	PGB1	60	30	2
3	PGB2	55	30	5
4	PGB3	50	30	9

Таблица 2
Table 2

Параметры испытаний
Test parameters

Скорость скольжения v, м/с ± 5 %	Давление p, Н/мм^2 ± 5 %	Нагрузка N, Н ± 5 %	Время, мин
2,045	0,27	30	20
4,085	0,52	50	50
6,127	0,78	70	80

компанией D. N. Polymers (Чинчвад, Пуна). До и после испытаний образцы (стержни и диски) взвешивались на прецизионных аналитических весах. Морфологические исследования поверхности износа проводили методом сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Результаты и их обсуждение

Исследование процесса изнашивания PGB0 в зависимости от нагрузки

Данное исследование посвящено изучению влияния средней нагрузки на износ композита PPS + 40 % GF (стекловолокно) при постоянной скорости скольжения. Для анализа трех рабочих параметров на трех уровнях была применена схема Тагучи L9, подробно представленная в табл. 3. Такой подход направлен на систематическое исследование влияния нагрузки на износ.

Результаты, представленные на рис. 1, показывают, что композит PGB0 в целом демонстрирует меньший износ по сравнению с чистым PPS. Отмечено, что износ PGB0 возрастает с увеличением нагрузки при скорости скольжения 2,0423 м/с (рис. 1). Это может быть связано с увеличением тепловыделения в зоне контакта под воздействием нагрузки, что приводит к размягчению полимерной матрицы и снижению сопротивления сдвигу, необходимого для удаления материала с поверхности образца.

Таблица 3
Table 3

Исследование изнашивания PGB0
Wear investigation of PGB0

№ п/п	Нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Время, мин	Ср. износ, мкм
1	30	200	20	5,58
2	30	500	50	123,52
3	30	800	80	142,25
4	50	200	20	163,22
5	50	500	50	189,42
6	50	800	80	192,87
7	70	200	20	419,12
8	70	500	50	822,53
9	70	800	80	825,15

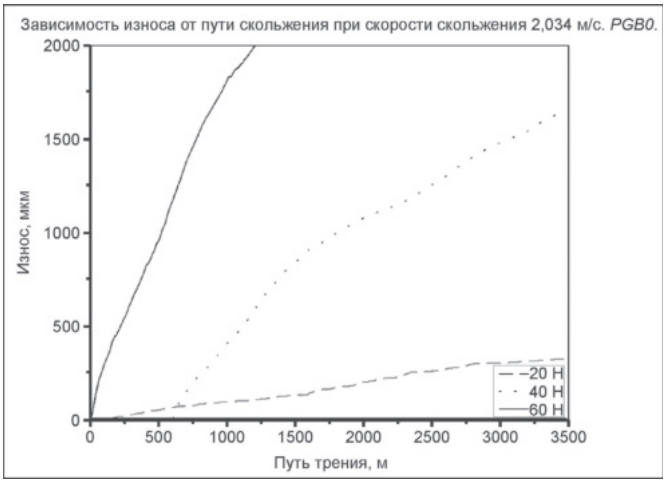


Рис. 1. Зависимость износа от пути скольжения. PGB0

Fig. 1. Wear vs Sliding Distance. *PGB0*

Исследование процесса изнашивания PGB1 в зависимости от нагрузки

Этот раздел посвящен исследованию влияния 1 % бентонитовой глины на износостойкость композита. Как указано в табл. 4, эксперимент был направлен на оценку износа в зависимости от пройденного пути при постоянной скорости скольжения 2,0434 м/с и различных значениях контактной нагрузки. Целью анализа являлось понимание влияния добавления 1 % глины на износостойкость композита при различных нагрузках.

Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что износ увеличивается с ростом контактной нагрузки. Такая тенденция наблюдалась для всех исследованных образцов. Сравнение

Таблица 4
Table 4

Исследование износа PGB1
Wear investigation for PGB1

№ п/п	Нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Время, мин	Ср. износ, мкм
1	30	200	20	3,54
2	30	500	50	42,35
3	30	800	80	46,89
4	50	200	20	57,35
5	50	500	50	98,96
6	50	800	80	100,78
7	70	200	20	105,42
8	70	500	50	110,54
9	70	800	80	117,67

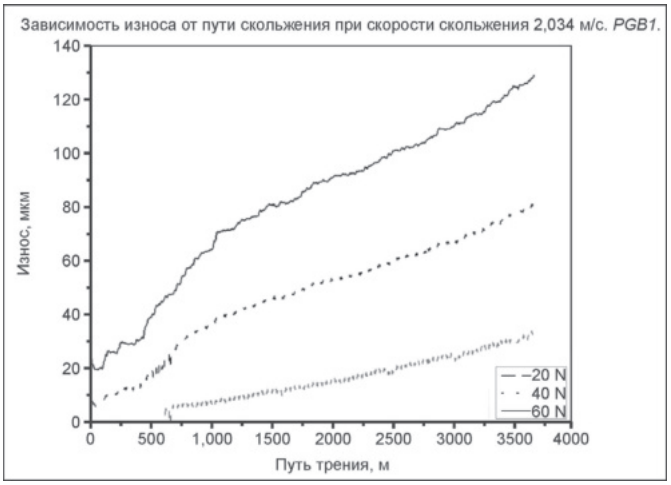


Рис. 2. Зависимость износа от пути скольжения. PGB1

Fig. 2. Wear vs Sliding distance. *PGB1*

с композитом PGB0 (рис. 2) демонстрирует, что добавление 1 % глины приводит к снижению износа, что, вероятно, связано с действием частиц глины в качестве твердой смазки и повышением сопротивления износу при аналогичных условиях эксплуатации. Однако при увеличении нагрузки наблюдается увеличение износа композита PGB1.

Влияние скорости скольжения на износ при постоянной нагрузке 20 Н

В данном разделе анализируется влияние скорости скольжения на износ при фиксированной контактной нагрузке 20 Н. Результаты, представленные на рис. 3, указывают на значительный абразивный износ материала. Износ возрастает с увеличением скорости скольжения, что соответствует трехстадийному характеру износа: начальное увеличение, достижение максимального значения и установившаяся стадия износа для каждой скорости скольжения. Минимальный износ наблюдается при скорости 2,0423 м/с, а максимальный – при 6,1269 м/с, что подчеркивает значительное влияние скорости скольжения на процесс изнашивания.

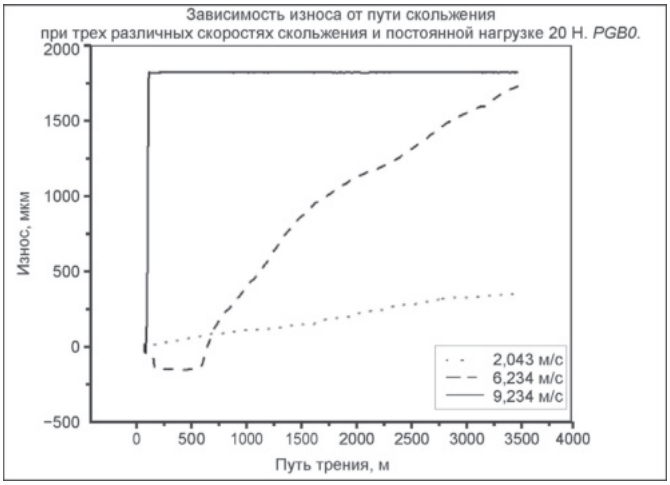


Рис. 3. Влияние скорости скольжения на износ при постоянной нагрузке 20 Н

Рис. 3. Effect of Sliding velocity on Wear at constant Load of 20 N

Влияние концентрации бентонитовой глины на износостойкость композита

Кривая износа (рис. 4) демонстрирует влияние содержания бентонитовой глины на износ композита. Композиты без глины характеризу-

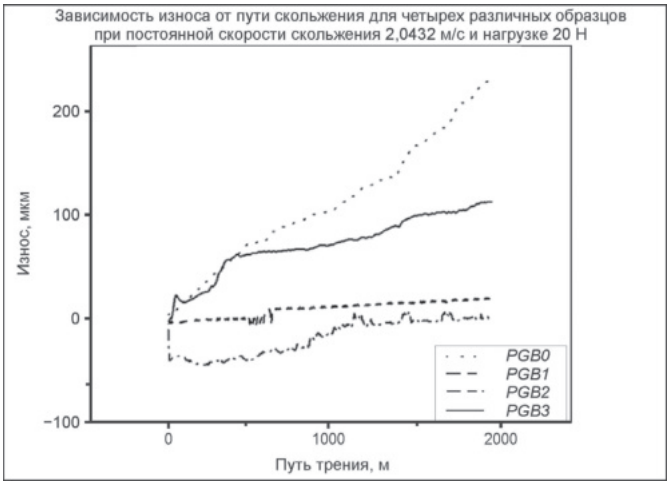


Рис. 4. Влияние бентонитовой глины на величину износа

Fig. 4. Effect of bentonite clay on Wear value

ются наибольшим износом. Повышение содержания глины до 3 % приводит к снижению износа. Дальнейшее повышение содержания глины (до 5 и 7 %) вызывает увеличение износа, что свидетельствует о существовании оптимальной концентрации глины.

Рис. 4 показывает снижение износа для композитов с 1 и 3 % бентонитовой глины и увеличение износа для композитов с 5 и 7 % глины. Композит с 7 % глины демонстрирует наибольший износ. Следовательно, для минимизации образования пыли при использовании в тормозных и фрикционных накладках содержание глины не должно превышать 3 %. Отмечено также увеличение износа с ростом нагрузки. Полученные результаты подтверждаются данными микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), представленными на рис. 5 и 6. На начальном этапе испытаний наблюдается увеличение скорости износа, что соответствует теории адгезионного изнашивания и обусловлено зацеплением о выступы на поверхности диска и композитного стержня. По мере продолжения испытаний происходит перенос материала на диск, что временно увеличивает скорость изнашивания. На заключительной стадии скорость износа стабилизируется. В случае образцов с бентонитовой глиной на начальных стадиях наблюдается снижение износа, связанное с адгезией и абразивным воздействием агломерированной глины. Композиты с 1 и 3 % глины показывают меньший износ, в то время как композиты с содержанием глины 5 % и более демонстрируют повышенный износ вследствие агломерации глины (табл. 5).

Влияние формирования слоя переноса на износ

Формирование слоя переноса на контртеле играет важную роль в определении трибологического поведения полимерных композитов. После формирования пленки переноса взаимодействие происходит между полимером и материалом пленки, а не с контртелом. Изучение характеристик пленок переноса необходимо для понимания механизмов изнашивания. Морфология поверхности износа композитов с различным содержанием глины, исследованная методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), представлена на рис. 5.

На рис. 5, *а* показано, что композитный стержень с бентонитовой глиной имеет меньше признаков адгезионного износа и задиров по сравнению с композитом без глины. Рис. 5, *б*, *в* демонстрируют наличие усталостных трещин

Таблица 5

Table 5

Данные исследования зависимости износа от нагрузки

Investigation data Wear v/s Load

Образец	Среднее значение износа, мкм		
	20 Н	40 Н	60 Н
PGB0	5,58	166,14	422,1
PGB1	3,6	58,32	112,32
PGB2	96,3	128,52	131,58
PGB3	274,86	362,16	402,66
PGB4	289,98	521,46	604,26

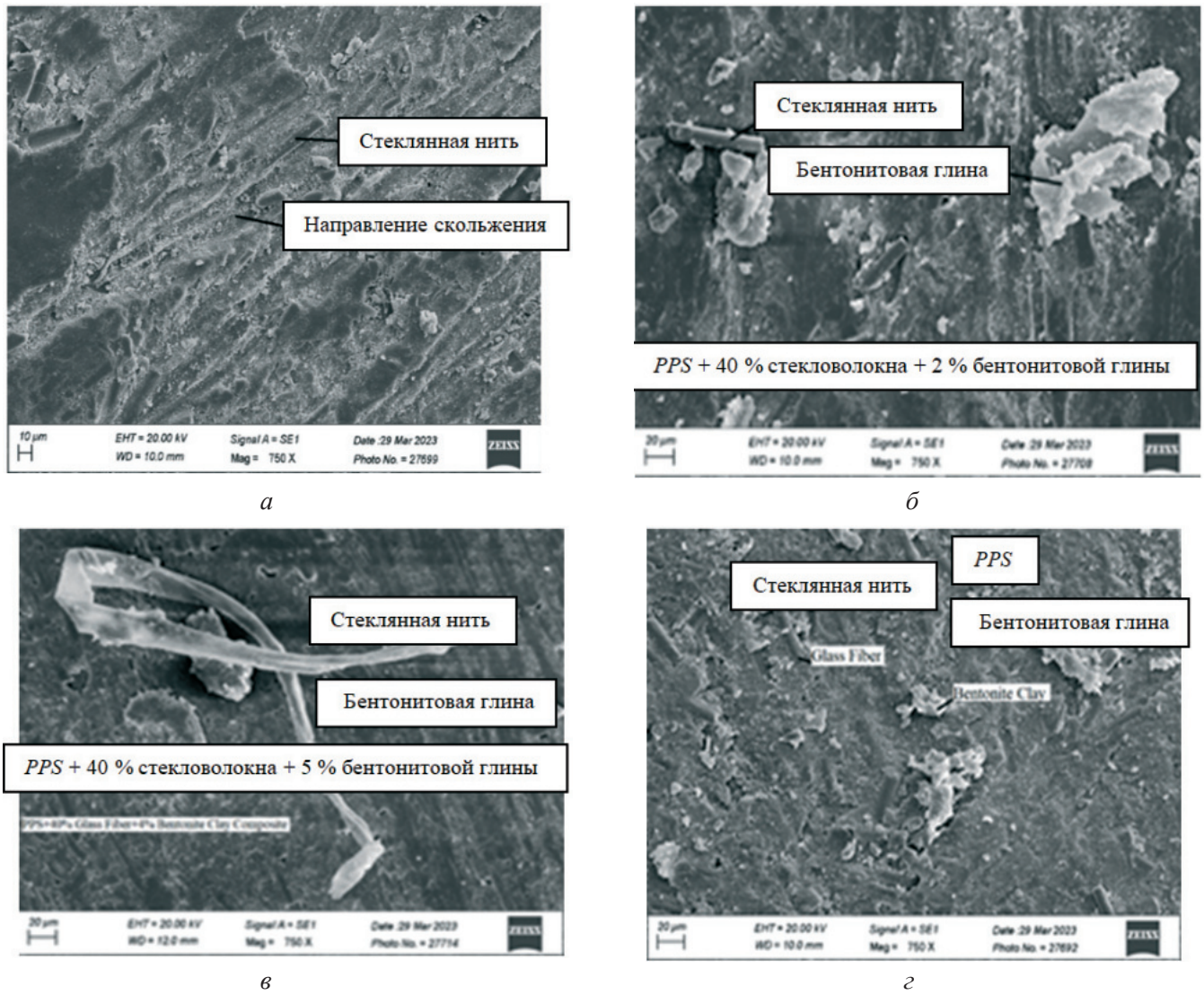


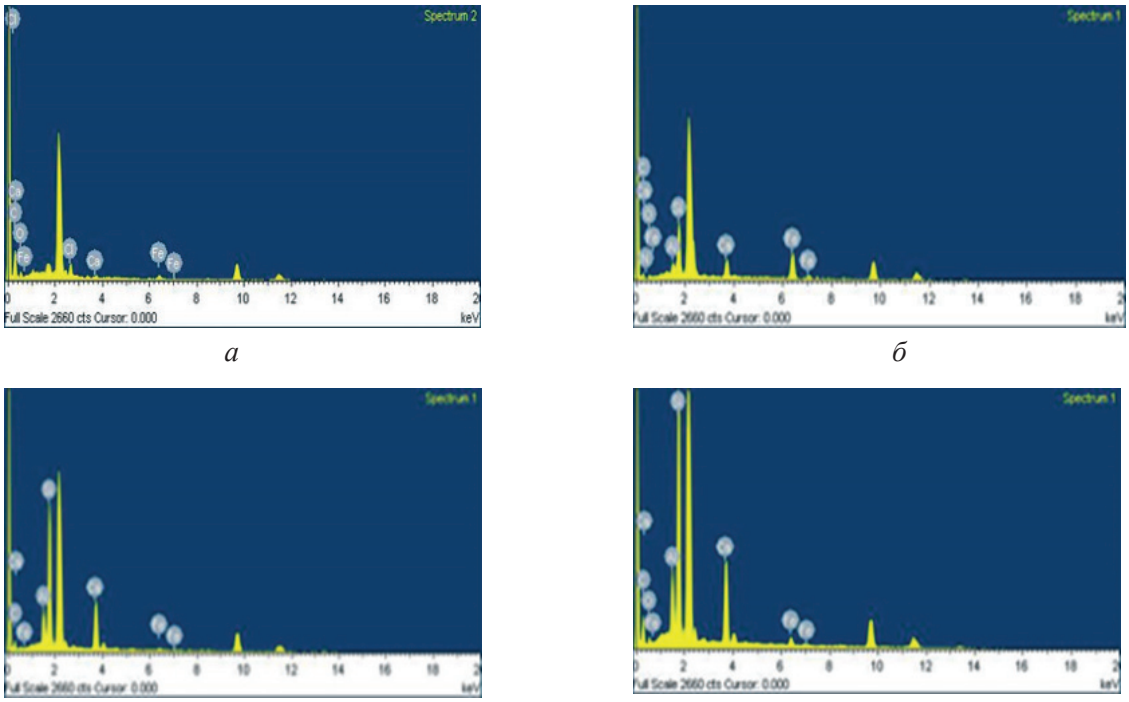
Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности стержня из композиционного материала:
а – PGB0; *б* – PGB1; *в* – PGB2; *г* – PGB3

Рис. 5. *SEM* images of the composite pin surface:
а – PGB0; *б – PGB1*; *в – PGB2*; *г – PGB3*

и агломерированных абразивных частиц в композите PPS / 40 % GF / 5 % бентонитовой глины, что указывает на снижение износа с увеличением содержания глины. На стальном диске наблюдается толстая несвязная пленка перена, что соответствует более низкой износостойкости композита PPS + GF без добавления глины. Рис. 5, *г* показывает, что в композите с 5 % бентонитовой глины происходит агломерация частиц глины, это увеличивает износ в результате адгезионных и абразивных процессов. Таким образом, небольшое количество бентонитовой глины предотвращает заедание и прилипание к матрице, способствуя формированию качественной переносной пленки на стальной поверхности и повышая износостойкость по сравнению с композитом PGB0 (без глины). Однако при высокой концентрации глины происходит агломерация частиц, что приводит к увеличению износа.

Данные спектроскопии

Энергодисперсионную спектроскопию (EDS) использовали для элементного анализа смесей. На рис. 6 представлены результаты EDS-анализа образцов PGB0, PGB1, PGB2 и PGB3, демонстрирующие их качественный состав. Система EDS, интегрированная со сканирующим электронным микроскопом (SEM), позволила провести химический анализ образцов. В спектрах EDS были идентифицированы следующие элементы: кремний, углерод, хлор, железо и каль-



а *б*

в *г*

Рис. 6. ЭДС-спектры:
а – PGB0; *б* – PGB1; *в* – PGB2; *г* – PGB3

Рис. 6. *EDS* Spectrum of:
а – PGB0; *б – PGB1*; *в – PGB2*; *г – PGB3*

ций. Присутствие железа и кальция, вероятно, связано с износом стальных дисков и переносом продуктов износа на поверхность образцов.

На рис. 6, *а–г* видно наличие бентонита, углерода и хлора, что подтверждает включение полифениленсульфида (PPS) и стекловолокна в состав композита. EDS-анализ также показывает увеличение концентрации алюминия, железа и кальция.

Влияние скорости скольжения на износ при различной нагрузке

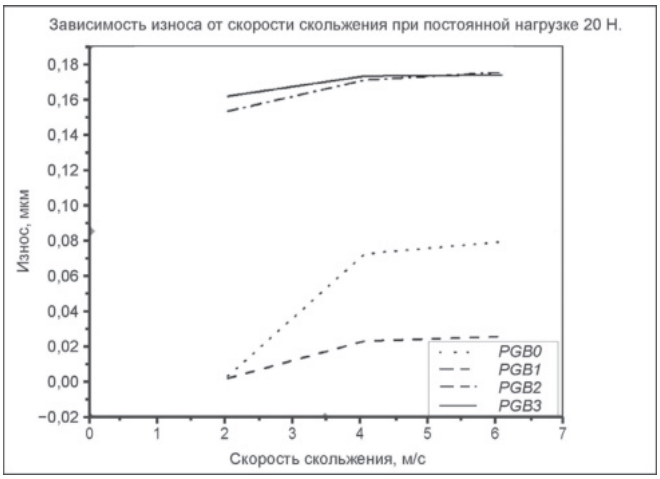
Планируется проведение дальнейших исследований для сравнения трибологических характеристик образцов с различным содержанием глины при постоянных значениях нагрузки и скорости скольжения.

На рис. 7 представлена зависимость износа от скорости скольжения для каждого образца. Увеличение скорости скольжения приводит к росту износа. Этот эффект может быть обусловлен преобладанием адгезионного механизма износа над абразивным. В рамках настоящего исследования изучали влияние бентонитовой глины на изнашивание композитов PPS + GF.

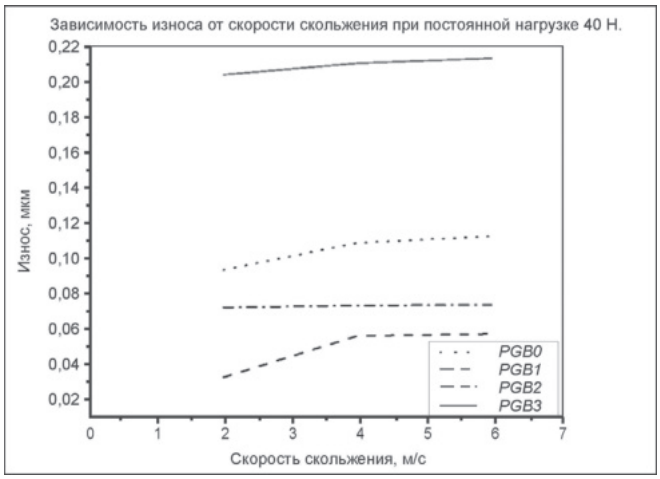
Влияние нагрузки на износ при минимальной скорости скольжения

Анализ влияния нагрузки на изнашивание при минимальной скорости скольжения важен для планирования экспериментов с использованием метода Тагучи. На рис. 8 показано, что увеличение нагрузки приводит к резкому увеличению износа для образца PGB0 (без глины). Образцы, содержащие бентонитовую глину, демонстрируют меньший рост износа с увеличением нагрузки по сравнению с PGB0.

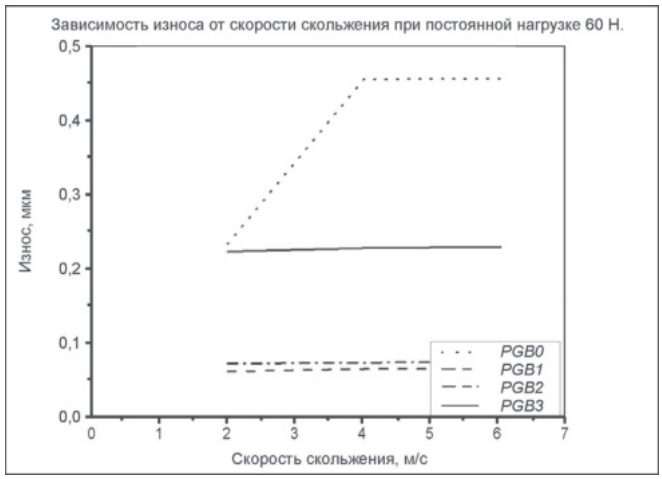
Увеличение нагрузки приводит к повышению температуры в зоне контакта, что размягчает полимерную матрицу и способствует расслоению полимерной пленки, обнажая стекловолокно. Введение бентонитовой глины замедляет процесс расслоения и снижает скорость роста износа по сравнению с PGB0. В образце PGB0 трение обусловлено взаимодействием между рассеченными и сломанными стекловолокнами и выступами на поверхности диска, что приводит к износу. Частицы бентонитовой глины, которые действуют как твердая смазка, снижают износ, задерживая перенос композитного материала с поверхности образца на диск.



а



б



в

Рис. 7. Зависимость износа от скорости скольжения

Fig. 7. Wear vs Sliding velocity

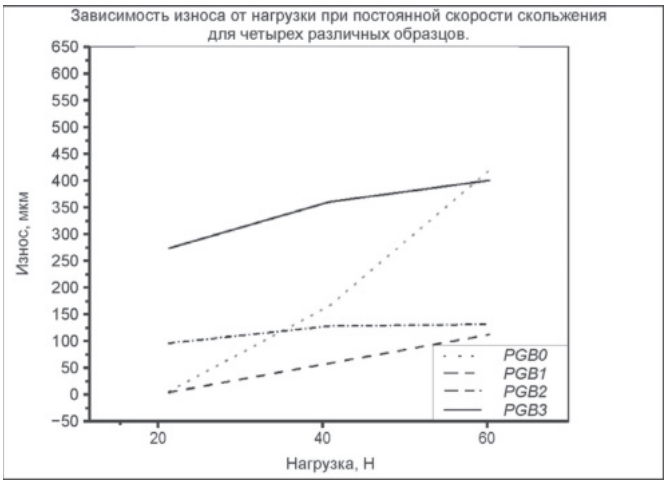


Рис. 8. Зависимость износа от нагрузки

Fig. 8. Wear vs Load

Заключение

В результате исследования влияния бентонитовой глины на износ композитов PPS + GF были сделаны следующие выводы.

– **Оптимизация содержания глины снижает износ:** добавление бентонитовой глины до определенной концентрации (до 3 % по массе) приводит к снижению скорости изнашивания. Это свидетельствует о том, что умеренное введение глины повышает износостойкость композита. Наименьший износ (3,6 мкм) наблюдался при содержании глины 3 %, в то время как для композита без глины при той же нагрузке (20 Н) значение износа составляло 5,58 мкм. При увеличении нагрузки до 40 и 60 Н износ композита без глины (166 и 422 мкм соответственно) значительно превышал износ композита с 3 % глины (58,32 и 112,32 мкм соответственно).

– **Превышение оптимального содержания глины увеличивает износ:** при концентрации глины выше оптимальной наблюдается увеличение скорости изнашивания. Вероятно, это связано с изменением механических свойств композита. При содержании глины более 2 % наблюдается существенное увеличение износа: при 5 и 9 % глины значения износа при нагрузке 20 Н составляют 96,3 и 274,86 мкм соответственно. Эти значения значительно превышают износ композита с 2 % глины. Аналогичная закономерность наблюдается и при более высоких нагрузках (40 и 60 Н).

– **Агломерация глины ухудшает износостойкость:** высокая концентрация бентонитовой глины может приводить к агломерации частиц в матрице PPS + GF. Агломераты, действуя как абразив, увеличивают скорость изнашивания.

– **Глина влияет на коэффициент трения**: добавление бентонитовой глины может снижать коэффициент трения благодаря ее смазывающим свойствам.

– **Небольшое количество глины улучшает трибологические характеристики**: небольшое количество бентонитовой глины (до 3 %) позволяет одновременно снизить износ и поддерживать оптимальный коэффициент трения, обеспечивая баланс между износостойкостью и фрикционными свойствами.

Список литературы

1. Tribological Investigations of Hemp Reinforced NAO Brake Friction Polymer Composites with Varying Percentage of Resin Loading / M. Naidu, A. Bhosale, M. Gaikwad, S. Salunkhe, R. Čep, E. Abouel Nasr // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – DOI: 10.3389/fmats.2024.1348265.

2. Wear and friction analysis of brake pad material using natural hemp fibers / M. Naidu, A. Bhosale, Y. Munde, S. Salunkhe, H.M.A. Hussein // Polymers. – 2023. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.3390/polym15010188.

3. Characterisation of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – a critical review / S. Huang, Q. Fu, L. Yan, B. Kasal // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 13. – P. 1441–84. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.076.

4. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics / L. Zhao, Y. Yu, H. Huang, X. Yin, J. Peng, J. Sun, L. Huang, Y. Tang, L. Wang // Composites, Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 174. – P. 106790. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.001.

5. *Niu F., He R., Li J.* Effects of clay and surface plasma-treated carbon fiber on wear behavior of thermoplastic POM composites // Surface and Interface Analysis. – 2018. – Vol. 50 (1). – P. 96–100. – DOI: 10.1002/sia.6342.

6. Effect of clay content on the morphological, thermo-mechanical and chemical resistance properties of propionic anhydride treated jute fiber/polyethylene/nanoclay nanocomposites / F. Md Hossen, S. Hamdan, R. Md Rahman, S. Md Islam, F.K. Liew, J.C.H. Lai, M. Md Rahman // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2016. – Vol. 90. – P. 404–411. – DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.006.

7. Fabrication of modified MMT/Glass/Vinylester multiscale composites and their mechanical properties / G. Mittal, V. Dhand, J.I. Ryu, K.Y. Rhee, H.-J. Kim, D.H. Jung // Journal of Nanomaterials. – 2015. – Vol. 2015 (1). – DOI: 10.1155/2015/506029.

8. *Carnevale P., Rasool S., Bersee H.E.N.* Fibre-matrix interfaces in carbon fibre reinforced PPS composites: damage initiation and propagation in tensile tests // Composite Interfaces. – 2014. – Vol. 21 (4). – P. 337–352. – DOI: 10.1080/15685543.2014.877288.

9. *Sarkar P., Modak N., Sahoo P.* Reciprocating friction and wear behavior of al particulate glass fiber reinforced epoxy composite // International Conference on Polymer Composites (ICPC-2014): Conference Paper. – Surathkal, Mangalore, India, 2014. – P. 163. – URL: https://www.researchgate.net/publication/273950830 (accessed: 10.02.2025).

10. *Unal H., Sen U., Mimaroglu A.* Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers

against steel counterface // Tribology International. – 2004. – Vol. 37 (9). – P. 727–732. – DOI: 10.1016/j.triboint.2004.03.002.

11. Effect of bentonite clay and polypropylene matrix on the properties of silk and glass fiber-reinforced hybrid composites / Md R.H. Mazumder, F. Numera, A. Al-Asif, M. Hasan // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2021. – Vol. 34 (12). – P. 1654–1665. – DOI: 10.1177/0892705719878231.

12. Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. II. Filled with PTFE / Z. Chen, X. Liu, T. Li, R. Lü // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 101 (2). – P. 969–977. – DOI: 10.1002/app.22061. – DOI: 10.1002/app.22061.

13. Influence of twin-screw elements on the dispersion of nano-clay in vinyl ester polymer composites using Taguchi's orthogonal array technique / R.G. Raj, G.G. Tanuja, C.L. Kumar, N.A.P. Nittala, M.K. Srinath, S.S. Abdullaev, D. Bandhu // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). – 2024. – Vol. 18 (5). – P. 3271–3285. – DOI: 10.1007/s12008-023-01492-5.

14. *Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S.* Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing processes for engineering design features: a study and recommendations // Communications on Applied Nonlinear Analysis. – 2024. – Vol. 31 (1s). – DOI: 10.52783/cana.v31.559.

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. *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). – DOI: 10.1063/5.0035408.

17. Experimental investigation of dry sliding wear behavior 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.

18. *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.

19. *Чинчаникар С.* Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12Х18Н10Т) // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

20. *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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 203–217
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-203-217

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Wear behavior study of glass fiber and organic clay reinforced poly-phenylene-sulfide (PPS) composites material

Vishavjit Bhanavase [a], ***Bhagwan Jogi*** [b, *], ***Yogiraj Dama*** [c]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-2268-2693, vlbhanavase@sinhgad.edu; [b] https://orcid.org/0000-0003-2099-7533, bfjogi@dbatu.ac.in;
[c] https://orcid.org/0009-0008-5404-4347, yogirajdama@dbatu.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 10 January 2025
Revised: 23 January 2025
Accepted: 03 February 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Poly-phenylene-sulphide (*PPS*)
Glass fibre
Bentonite clay
Friction and wear
Tribological testing using the "pin-on-disc" method
Taguchi design
Wear behavior

ABSTRACT

Introduction. This study investigates the influence of key operating parameters (load, sliding velocity, and sliding distance) on the wear behavior of composites made of 40 % glass fiber and polyphenylene sulphide (*PPS*), with varying weight fractions of bentonite clay. The main purpose was to evaluate how different experimental conditions affect the wear characteristics. To achieve this, experiments were conducted using a *Taguchi L9* orthogonal array at three levels of complexity. The tribological tests were performed on a pin-on-disc setup, following *ASTM G99* standards, with six material samples containing different weight fractions of bentonite clay. The results show that wear of the original (virgin) sample increases with an increase in the applied average load. In contrast, samples containing bentonite clay exhibit a decrease in wear with increasing average load. Furthermore, an increase in the bentonite clay content leads to a significant reduction in wear, but a further increase to 7 % clay results in a noticeable increase in wear values. **Research Methods.** This study investigates the effect of load, sliding velocity, and weight fraction of bentonite clay on the wear and coefficient of friction (*COF*) of a composite material. Composite samples with varying clay content were tested using a pin-on-disc setup, and wear and *COF* were measured as dependent parameters. Scanning electron microscopy (*SEM*) was used to analyze the wear surfaces after testing to reveal the influence of independent parameters on wear mechanisms and surface morphology. The results revealed important trends in the friction and wear behavior under different conditions. Comparative analysis provided insights into optimizing the tribological performance of the material by balancing load, velocity, and clay content. **Result and Discussion.** This study investigates the effect of bentonite clay addition on the wear behaviour of *PPS* + *GF* composites. The findings reveal that wear decreases by up to 3 % with an increase in the weight percentage of bentonite clay, but increases again with a further increase in clay content. It is noted that a higher weight fraction of bentonite clay leads to an increase in the specific wear rate and a decrease in the coefficient of friction due to the manifestation of an abrasive wear mechanism caused by clay agglomeration. Conversely, a lower clay weight fraction promotes a reduction in the wear rate while increasing the coefficient of friction.This work intends to address the dual challenge of performance optimization and cost reduction in friction and wear applications. **The need of the work.** The purpose of this research is to develop an organic polymer composite that exhibits both high performance and cost-effectiveness. One of the key objectives is to create such a composite material using bentonite clay, an organic and readily available material that can be sourced at a low cost. This will enable the production of a competitively priced composite without compromising quality. Another goal of the research is to replace existing friction materials in brake and clutch systems with the newly developed composite, potentially improving its performance and durability. Furthermore, this work aims to create a composite material suitable for use in sliding bearings, particularly those operating in corrosive environments. Such a composite should possess increased resistance to chemical degradation, ensuring an extended lifespan and reliability under severe operating conditions.

For citation: Bhanavase V., Jogi B.F., Dama Y.B. Wear behavior study of glass fiber and organic clay reinforced poly-phenylene-sulfide (PPS) composites material. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 203–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-203-217. (In Russian).

*** Corresponding author**
Jogi Bhagwan Fatru, Professor
Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University,
Lonere, Raigad,
402103, Maharashtra, India
Tel.: +91 942-116-6370, **e-mail:** bfjogi@dbatu.ac.in

References

1. Naidu M., Bhosale A., Gaikwad M., Salunkhe S., Čep R., Abouel Nasr E. Tribological investigations of hemp reinforced NAO brake friction polymer composites with varying percentage of resin loading. *Frontiers in Materials*, 2024, vol. 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1348265.

2. Naidu M., Bhosale A., Munde Y., Salunkhe S., Hussein H.M.A. Wear and friction analysis of brake pad material using natural hemp fibers. *Polymers*, 2023, vol. 15 (1). DOI: 10.3390/polym15010188.

3. Huang S., Fu Q., Yan L., Kasal B. Characterisation of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – a critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 13, pp. 1441–1484. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.076.

4. Zhao L., Yu Y., Huang H., Yin X., Peng J., Sun J., Huang L., Tang Y., Wang L. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics. *Composites, Part B: Engineering*, 2019, vol. 174, p. 106790. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.001.

5. Niu F., He R., Li J. Effects of clay and surface plasma-treated carbon fiber on wear behavior of thermoplastic POM composites. *Surface and Interface Analysis*, 2018, vol. 50 (1), pp. 96–100. DOI: 10.1002/sia.6342.

6. Hossen Md F., Sinin H., Rahman Md R., Islam Md S., Liew F.K., J.C.H. Lai, Rahman Md M. Effect of clay content on the morphological, thermo-mechanical and chemical resistance properties of propionic anhydride treated jute fiber/polyethylene/nanoclay nanocomposites. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2016, vol. 90, pp. 404–411. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.006.

7. Mittal G., Dhand V., Ryu J.I., Rhee K.Y., Kim H.-J., Jung D.H. Fabrication of modified MMT/Glass/Vinylester multiscale composites and their mechanical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2015, vol. 2015 (1). DOI: 10.1155/2015/506029.

8. Carnevale P., Rasool S., Bersee H.E.N. Fibre-matrix interfaces in carbon fibre reinforced pps composites: damage initiation and propagation in tensile tests. *Composite Interfaces*, 2014, vol. 21 (4), pp. 337–352. DOI: 10.1080/15685543.2014.877288.

9. Sarkar P., Modak N., Sahoo P. Reciprocating friction and wear behavior of al particulate glass fiber reinforced epoxy composite. *International Conference on Polymer Composites (ICPC-2014): Conference Paper*, Surathkal, Mangalore, India, 2014, p. 163. Available at: https://www.researchgate.net/publication/273950830 (accessed 10.02.2025).

10. Unal H., Sen U., Mimaroglu A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*, 2004, vol. 37 (9), pp. 727–732. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.03.002.

11. Mazumder Md R.H., Numera F., Al-Asif A., Hasan M. Effect of bentonite clay and polypropylene matrix on the properties of silk and glass fiber-reinforced hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2021, vol. 34 (12), pp. 1654–1665. DOI: 10.1177/0892705719878231.

12. Chen Z., Liu X., Li T., Lü R. Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. II. Filled with PTFE. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 101 (2), pp. 969–977. DOI: 10.1002/app.22061.

13. Raj R.G., Tanuja G.G., Kumar C.L., Nittala N.A.P., Srinath M.K., Abdullaev S.S., Bandhu D. Influence of twin-screw elements on dispersion of nano-clay in vinyl ester polymer composites using Taguchi's orthogonal array technique. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024, vol. 18 (5), pp. 3271–3285. DOI: 10.1007/s12008-023-01492-5.

14. Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S. Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing processes for engineering design features: a study and recommendations. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31(1s). DOI: 10.52783/cana.v31.559.

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. 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). DOI: 10.1063/5.0035408.

17. Paturkar A., Mache A., Deshpande A., Kulkarni A. Experimental investigation of dry sliding wear behavior 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.

18. 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.

19. Chinchanikar 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.

20. 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.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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 (***I**ntroduction*);
- методы (***M**ethods*);
- результаты (***R**esults*);
- обсуждение (***D**iscussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements* / *Funding*);
- список литературы (*References*).

АННОТАЦИЯ к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье) (см. примеры в разделе «Правила оформления»). Аннотация должна включать следующие аспекты содержание статьи: *обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы*.

В аннотации Вы должны выдержать структуру **IMRAD** и **четко указать в тексте (как для русской, так и для английской версии)** соответствующие разделы: **Introduction (введение)**; **Methods (методы)**; **Results and Discussion (результаты и обсуждения)** (*см. пример*).

Объем аннотации (реферата) на русском языке должен быть 200…250 слов. Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!

Пример структурированной аннотации

• На русском языке

Введение. Сварка оказывает большое влияние на работоспособность создаваемых конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, вследствие снижения сопротивляемости зарождению и распространению трещин в зоне термического влияния и металла шва. Несмотря на существующее достаточно большое количество способов повышения надежности сварных соединений, некоторые из них сейчас полностью исчерпали свои возможности,

а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому разработка необходимой специальной технологии сварки в условиях низких температур остается актуальной проблемой. **Цель работы:** изыскание путей повышения надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения при сварке в условиях низких температур. **В работе исследованы** сварные соединения стали 09Г2С, полученные сваркой на постоянном токе и в режиме импульсной низкочастотной модуляции тока в условиях положительных (+20 °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. Подтверждён эффект измельчения структуры металла шва при использовании адаптивной импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами, в том числе и в условиях отрицательной температуры окружающего воздуха (вплоть до –45 °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 подрисуночная подпись (на **русском и на английском языке!**). Шрифты на рисунках должны быть увеличены и приведены к единообразию. Уважаемые авторы, журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является полноцветным печатным изданием. В вашей работе присутствуют рисунки, которые (для повышения наглядности) рекомендуется сделать цветными.

Название таблиц (как и внутреннее содержание) должно быть как на русском, так и на английском языках! (см. **«Правила оформления»**.)

Математические формулы: сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны **только в редакторе формул Microsoft Equation 3.0**!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / *References*

Список цитируемой литературы включает источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации. Количество литературных ссылок должно быть **не менее 20** с большей (**более 50 %**) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны

иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать **15–17 %**. Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в списке литературы и в *References* лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (**ГОСТ 7.0.5–2008**) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. http://ru.translit.net/?account=bsi) или (https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bsi).

Если статья имеет DOI – обязательно указать его! Если книга имеет ISBN – обязательно указать его!

Обратите внимание на правила оформления русскоязычных источников в англоязычном блоке статьи (в References).

Финансирование

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) …».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем 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 прислать 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*** (•*Introduction*, •*Methods*, •*Results*, •*Discussion*, •*Conclusion*).

Paper submission

In order to submit a paper, the **author (all co-authors!)** should be signed up for the journal website. The author (one of the co-authors) in his office selects the "Submit a paper" in the menu and enters all the necessary data. The author selects his/her co-authors from the list of registered users.

Important: The work should be received no later than 3 months before the official publication of the issue according to the schedule. In exceptional cases, in agreement with the editors of the journal, the deadline for submitting a paper to the next issue can be extended, but not more than two weeks.

Schedule of the journal publication during the year

Issue	*Publication (month, date)*
1	03/15
2	06/15
3	09/15
4	12/15

Before sending the manuscript to the editors, the authors are highly recommended to check their paper using the **Anti-plagiarism** system. The allowable percentage of text borrowing from other sources is 5–10 %.

The manuscript of the paper is prepared in accordance with the formatting rules in MS Word and is attached in *.doc, *.docx format.

The scanned license agreement with the signatures of the authors and the expert opinion (**color mode, resolution of at least 600 dpi**) should also be attached on the journal's website in the "Submit Paper" section in *.pdf, *.jpg, *.jpeg formats.

At the end of all the work, be sure to click the "Send to the Editor" button.

Simultaneously with the article, the original expert opinion on the possibility of open publication of the article is sent to the postal address of the editorial office: 630073, Novosibirsk, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk State Technical University (NSTU), bldg. 5, com. 137VTs, the deputy editor-in-chief Vadim Y. Skeeba.

When a manuscript is accepted for publication, an **author's license agreement** is additionally sent to the postal address of the editorial office.

All manuscripts are reviewed. There is no fee for publishing manuscripts.

Paper submission guidelines:

See the section "Paper Submission guidelines" (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules). Please read carefully all the points presented in these sections.

When formatting your work, it is recommended to use the template presented on the journal's website: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Authors affiliation

A list of authors should contain Full names. Names and Surnames of the author(s) should be written out. The full name of the organization for each of the authors, indicating the street, house number, city, postal code and country also should be written. For each of the authors, it is MANDATORY to indicate its unique identification code ORCID (Open Researcher and Contributor ID), RSCI AuthorID and e-mail. If there is no ORCID, then it is necessary to follow the link **https://orcid.org/** and register in the system. After registration, you need to edit your personal data and the list of publications.

After registering ORCID, you need to EDIT YOUR PERSONAL DATA AND THE LIST OF PUBLICATIONS IN THIS PROFILE (**"an empty" ORCID profile is not allowed!**). When uploading papers, give preference to English-language sources. **It is also recommended: when registering a profile in ORCID, use the Latin alphabet, not Cyrillic!**; indicate the full name, not the abbreviation. Do not confuse First name and Last name. If such errors are found, be sure to correct your profile! After filling out the profile, it is necessary to provide access to public information.

A huge request to all authors is also to check and correct the data in their profiles on the SCOPUS and WoS platforms. Indicate all your digital identifiers (CI) in your profile on the journal's website. **Attention!** When entering the corresponding CI, before saving the entered values in the profile, you need to look at the example and click on the "Check Profile" button located next to it. If the entered values are correct, the publishing system of the journal will open the corresponding page on the Internet with your data. Be careful when entering the RSCI AuthorID. This digital identifier should not be confused with the SPIN code.

Attention – the RSCI AuthorID should be entered by each author in his/her profile on the journal's website!

The scientific paper should have the structure of *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results and Discussion*):

- *Title*;
- *Abstract*;
- ***I**ntroduction*;
- ***M**ethods*;
- ***R**esults*;
- ***D**iscussion*;
- *Conclusion*;
- *Acknowledgements* / *Funding*;
- *References*.

Abstract

Paper ***abstract*** should be: informative (do not contain general words); original; meaningful (reflect the main content of the paper and the research results); structured (follow the results description logic) (see examples in the section "Paper Submission guidelines"). The abstract should include the following aspects of the content of the paper: *the rationale; the subject*; *the purpose of the work*; *method or methodology of the work*; *results of work*; *the field of application of the results*; *conclusions*.

In the abstract, you should adhere to the structure of **IMRAD** and **clearly indicate in the text (for both Russian and English versions)** the corresponding sections: **Introduction**; **Methods**; **Results and Discussion** (*see an example*).

The volume of the abstract in English should be at least 250 words!

An example of a structured abstract:

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide 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.

Introduction

The "***Introduction***" section should be used to define the place of your work (approach, data or analysis) (**up to 1.5-2 pages**). It is understood that there is an unresolved or emerging scientific problem that is being addressed in your paper. In this regard, this section should provide a sufficiently informed (with evenly distributed references to sources) literature review on the state of the indicated problem. Most of the links should be given in this section! At the end of the "**Introduction**" section, **the purpose of the work** is formulated and the **tasks** are indicated, the solution of which will allow achieving the set goal. There is no need to write about a specific result in this section, since there is a corresponding section in the structure of the paper.

METHODS / METHODS OF RESEARCH

Theory (for theoretical works) or **Experimental technique** (for experimental works). One should avoid repetitions, unnecessary details and known provisions, detailed derivations of formulas and equations (give only the final formulas, explaining how it was obtained.

The rationale for the choice of this material (or materials) and methods for describing the material (materials) in this work are given.

If necessary, drawings of samples with units of measurement are given (units of measurement in SI system only). When testing reference materials, reference to the standard is sufficient. For a large test program, it is advisable to use a matrix-type table. If samples are taken from ingots, billets or components, then its orientation and location in the source material are described; standard designations according to the standard are used.

During the tests, the following information is provided: 1. Type and conditions of tests, for example, test temperature, loading rate, environment; 2. Describes the variable parameters, measured values and methods of its measurement with accuracy, degree of error, resolution, etc .; for quantities that have been calculated, the methods used to calculate it.

RESULTS AND ITS DISCUSSION

A section contains a brief description of the experimental and/ or theoretical data obtained. The presentation of the results should consist in identifying the discovered patterns, and not in a mechanical retelling of the contents of tables and graphs. It is recommended to present the results in the past tense. The discussion should contain the interpretation of the research results obtained by **you** (correspondence of the results to the research hypothesis, generalization of the research results, proposals for practical application, proposals for the direction of future research).

The above recommendations are also relevant for theoretical and computational work. In papers based on computational work, you should specify the finite element type, boundary conditions and input parameters. The numerical result is presented taking into account the limitations (accuracy) in the applied computational methods.

In papers based on analytical work, when presenting a long series of formulas, it is necessary to provide an explanatory text so that the essence of the content of the work is clear. The correctness of the calculations should be confirmed by intermediate calculations. As in the case of experimental work, a simple description of numerical or analytical transformations without considering the theoretical (physical) root cause is usually not enough to justify the publication of such a paper. A simple report of numerical results in the form of tables or in the form of text, as well as endless data from experimental work, without trying to determine or hypothesize why such results were obtained, without trying to identify causal relationships, does not decorate the work.

Comparing your numerical results to the numerical results obtained by someone else can be informative. But it doesn't prove anything. Control by comparison with commonly known solutions and verification by comparison with experimental data are mandatory.

Discussion

Use this section to fully explain the significance of your approach, data or analysis and results. This section organizes and interprets the results. The purpose of this section is to show what knowledge has been gained as a result of your work and to show the perspective of the results obtained by comparing it with the current situation in this area described in the "Introduction" section. A large number of graphs and color illustrations do not give a scientific result. It is the responsibility of the author to

organize the data and present the results systematically. Thus, simply reporting test results without attempting to investigate internal mechanisms is of little value.

CONCLUSION / CONCLUSIONS

This section usually begins with a few phrases summarizing the work done, and then the main conclusions are presented in the form of a list. Should be concise.

Graphics quality!

We remind you that according to the requirements of the journal, charts and diagrams should be prepared in vector graphic editors. The resolution of the figures is not less than 600 dpi.). Under each figure there should be a corresponding caption (**in Russian and in English!**). The fonts in the figures should be enlarged and brought to uniformity. Dear authors, the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" is a full-color printed edition. If your work contains drawings, it is recommended to make it in color (for clarity).

The tables' headings (as well as the internal content) should be both in Russian and English! (see "Paper Submission guidelines")

Mathematical formulas: complex and multi-line formulas should be typed **entirely in the formula editor Microsoft Equation 3.0!**

References

The list of cited literature includes sources containing materials that the author used when writing the paper, and is drawn up according to the samples below. The composition of literary sources should reflect the state of scientific research in different countries in the problem area under consideration. Links should be available to the scientific community, so the DOI of the publication is desirable. The number of references should be **at least 20** with **more than 50 %** of foreign sources. References in the text are given in square brackets, for example [1] or [2–5]. The numbering of sources should correspond to the order of references to it in the text. Links to extended abstract of dissertation and dissertations are allowed if its available electronic versions are available. References to textbooks, teaching aids, monographs should be of subordinate importance and should not exceed 10–15%, since it is not easily accessible to the general scientific community. Links to unpublished works are not allowed. Self-citation should not exceed **15–17 %**. If the work was published in both Russian and English (or other) languages, then it is better to give a link to the translated work in the References. In connection with the entry of the journal into the citation database of scientific publications, in addition to the traditional list of references (**GOST 7.0.5–2008**), an additional list is required with the translation of Russian-language sources into Roman type and English language. Transliteration is strictly according to the BSI system (see http://ru.translit.net/?account=bsi) or (https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bsi).

If the paper has a DOI, be sure to indicate it! If the book has an ISBN, be sure to include it!

Pay attention to the guidelines for formatting Russian-language sources in the English-language section of the paper (in References).

Dear Authors, the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" has successfully passed the re-registration procedure with ROSCOMNADZOR and, starting from 2021, is switching to the publication of a scientific publication in two languages. The first – printed (basic) – in Russian with an English part; the second – Electronic Publications (pdf) – all the work is completely in English. **After receiving a message about the acceptance of the paper for publication in the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science", the authors should provide a high-quality translation of their paper into English** (machine translation is not allowed!). English version of the work should be formatted according to the template. **Attention!** The English version of the paper should be sent to the journal's mail (metal_working@mail.ru) within 2 weeks!

Editorial board and editorial council of the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science"

МАТЕРИАЛЫ СОУЧРЕДИТЕЛЕЙ

Внимание, инженеры и технические специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией, наладкой электроавтоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков, а также студенты и аспиранты профильных специальностей вузов, соучредитель журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)» ООО Научно-производственная коммерческая фирма «МАШСЕРВИСПРИБОР» готова предоставить свои страницы под рубрику «Системы автоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков».

В представляемых для данной рубрики статьях должны быть изложены проблемы и их решения в рамках следующих тем:

– системы ЧПУ;
– станочные электроприводы;
– датчики и элементы станочной электроавтоматики;
– модернизация систем автоматики и электроприводов;
– импортозамещение;
– автоматизация разработки технологических программ для станков с ЧПУ.

Преимуществом публикации будут пользоваться статьи, где отражены разработка и производство отечественных систем и элементов электроавтоматики, а также темы, посвященные импортозамещению. Для авторов статей под указанной выше рубрикой публикация является бесплатной.

Важно! Работа должна поступить не позднее чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях по согласованию с редакцией журнала срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели. Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы Антиплагиат. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %. Объем материалов рубрики в одном выпуске журнала не должен превышать трех печатных страниц журнала (15 000 знаков без пробелов).

Материалы для публикации принимаются ООО Научно-производственной коммерческой фирмой «МАШСЕРВИСПРИБОР» (e-mail: msp@chpu.ru). Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

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 МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. ***Публикация статей бесплатная.***

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: **«Технология»**, **«Оборудование»**, **«Инструменты»**, **«Материаловедение»**, **«Научно-техническая информация»** и др.

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

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

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

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ

+7 (383) 346-17-75

metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-80400 от 01 марта 2021 г.
Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X
Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590

НОВОСИБИРСК

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

Volume 27 Number 1 JANUARY – MARCH 2025

OBRABOTKA METALLOV

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

NOVOSIBIRSK