

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 25, Номер 3

ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ 2023

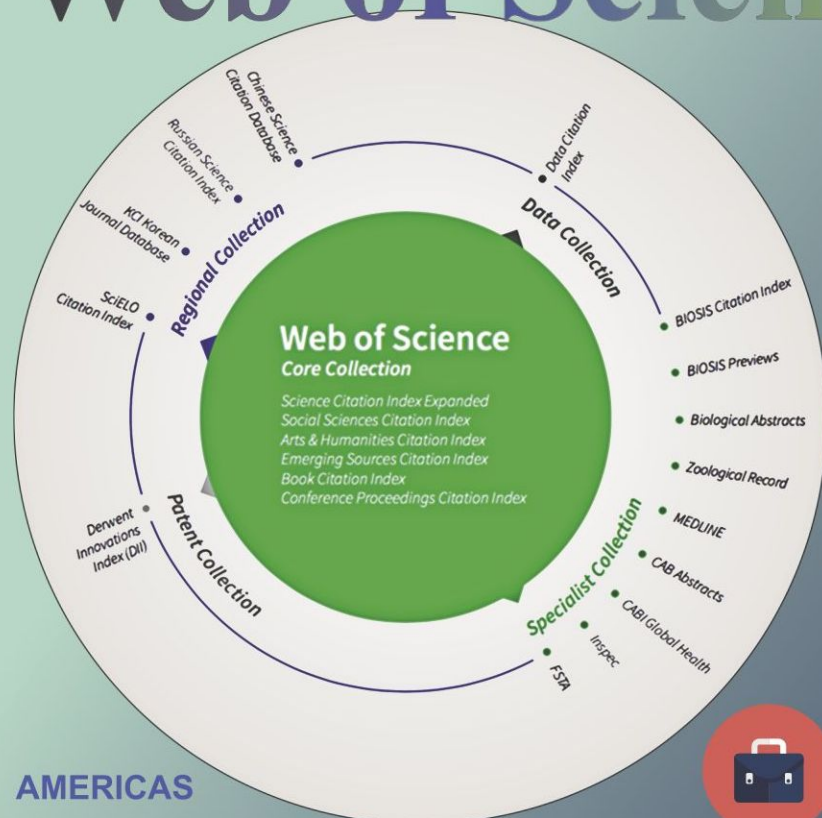
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science



Academic
Search™
Ultimate



Applied Science
& Technology
Source™ Ultimate



Business Source®
Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete
office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

Расширенная версия **ULTIMATE**
для успеха в научной работе

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 25 № 3 2023 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

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



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

WEB OF SCIENCE



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



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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

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

Адрес редакции и издателя:

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

Тел. +7 (383) 346-17-75

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

Салихьянов Д.Р., Мичуров Н.С. Моделирование процесса прокатки слоистого композита АМгЗ/Д16/АМгЗ.....	6
Ильиных А.С., Пикалов А.С., Милорадович В.К., Галай М.С. Экспериментальные исследования режимов скоростного шлифования рельсов.....	19
Салихьянов Д.Р., Мичуров Н.С. Концепция микромоделирования процесса соединения разнородных материалов пластической деформацией.....	36

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Тратия Д.К., Шеладия М.В., Ачарья Г.Д., Ачарья Ш.Г. Разработка экономичной конструкции коленчатого вала механического пресса с С-образной станиной на основании результатов анализа топологии.....	50
Скиба В.Ю., Вахрушев Н.В., Титова К.А., Черников А.Д. Рационализация режимов поверхностной закалки ВЭН ТВЧ рабочих поверхностей пуансона в условиях гибридной обработки.....	63

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Руктуев А.А., Юргин А.Б., Шикалов В.С., Ухина А.В., Чакин И.К., Домаров Е.В., Довженко Г.Д. Структура и свойства композиционного покрытия на основе высокоэнтропийного сплава, упрочненного частицами CrB.....	87
Майтаков А.Л., Грачев А.В., Попов А.М., Ли С.Р., Ветрова Н.Т., Плотников К.Б. Исследование рассеяния энергии и жесткости сварных соединений стыковой сварки давлением.....	104
Сингх С.П., Хирвани Ч.К. Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний волокнистого полимерного композита на основе обработанных волокон муньи.....	117
Прибытков Г.А., Барановский А.В., Коржова В.В., Фирсина И.А., Кривопапов В.П. Синтез интерметаллидов системы Ti–Fe из смесей элементарных порошков.....	126
Сингх С.П., Хирвани Ч.К. Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний полимерного композита на основе переплетенных обработанных волокон джута.....	137

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ	152
---------------------------	-----

МАТЕРИАЛЫ СОУЧЕРЕДИТЕЛЕЙ	163
---------------------------------	-----

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 06.09.2023. Выход в свет 15.09.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 20,5. Уч.-изд. л. 38,13. Изд. № 167. Заказ 245. Тираж 300 экз.

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 25 No.3 2023 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

Anatoliy A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

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

Editor of the English translation:

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

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year



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

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



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



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

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia

Tel.: +7 (383) 346-17-75

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

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

EDITORIAL COUNCIL CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Spain:

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

Victor P. Balkov, Deputy general director,
Research and Development Tooling Institute “VNIINSTRUMENT”, *Moscow*;

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

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

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

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

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Corresponding Member of RAS,
Head of division, Head of laboratory (Laboratory of Mechanical Properties)
M.N. Miheev Institute of Metal Physics,

Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*;

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

Salikhyanov D.R., Michurov N.S. Simulation of the rolling process of a laminated composite AMg3/D16/AMg3.....	6
Ilinykh A.S., Pikalov A.S., Miloradovich V.K., Galay M.S. Experimental studies of high-speed grinding rails modes.....	19
Salikhyanov D.R., Michurov N.S. The concept of microsimulation of processes of joining dissimilar materials by plastic deformation.....	36

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Tratiya D.K., Sheladiya M.V., Acharya G.D., Acharya S.G. Economical crankshaft design through topology analysis for C type gap frame power press SNX-320.....	50
Skeeba V.Yu., Vakhrushev N.V., Titova K.A., Chernikov A.D. Rationalization of modes of HFC hardening of working surfaces of a plug in the conditions of hybrid processing.....	63

MATERIAL SCIENCE

Ruktuev A.A., Yurgin A.B., Shikalov V.S., Ukhina A.V., Chakin I.K., Domarov E.V., Dovzhenko G.D. Structure and properties of HEA-based coating reinforced with CrB particles.....	87
Maytakov A.L., Grachev A.V., Popov A.M., Li S.R., Vetrova N.T., Plotnikov K.B. Study of energy dissipation and rigidity of welded joints obtained by pressure butt welding.....	104
Singh S.P., Hirwani C.K. Analysis of mechanical behavior and free vibration characteristics of treated Saccharum munja fiber polymer composite.....	117
Pribytkov G.A., Baranovskiy A.V., Korzhova V.V., Firsina I.A., Krivopalov V.P. Synthesis of Ti-Fe intermetallic compounds from elemental powders mixtures.....	126
Singh S.P., Hirwani C.K. Free vibration and mechanical behavior of treated woven jute polymer composite.....	137

EDITORIAL MATERIALS	152
----------------------------	-----

FOUNDERS MATERIALS	163
---------------------------	-----



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3

Денис Салихьянов^{1, 2, а, *}, Николай Мичуров^{2, 3, в}

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

² Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³ Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, ул. Мира, 22, г. Екатеринбург, 620062, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-7235-7111>,  d.r.salikhianov@urfu.ru, ^в  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>,  n.michurov@ya.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669

История статьи:

Поступила: 28 апреля 2023

Рецензирование: 20 мая 2023

Принята к печати: 13 июня 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Слоистые композиты
Алюминиевые сплавы
Совместная прокатка
Напряженно-деформированное состояние
Соединение материалов
Конечно-элементное моделирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20243 «Мульти-масштабное моделирование процессов соединения разнородных материалов пластической деформацией» при поддержке правительства Свердловской области.

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние десятилетия слоистые композиты на основе алюминиевых сплавов находят все большее применение в авиакосмической и автомобильной промышленности. Слоистые композиты обычно получают совместной прокаткой, в ходе которой происходит металлургическое соединение предварительно подготовленных листов. Основная задача совместной прокатки заключается в получении надежного соединения между материалами. На настоящий момент процесс соединения однородных и разнородных материалов пластической деформацией все еще остается малоизученным явлением. В связи с этим за последнее время большое развитие получили методы конечно-элементного моделирования процессов соединения материалов. **Цель работы** заключается в установлении связи между показателями напряженно-деформированного состояния и формированием устойчивого соединения между алюминиевыми сплавами разных составов. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи работы**: 1) моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3 с данными, которые соответствуют физическим экспериментам, выполненным в ИМАШ УрО РАН; 2) выбор и анализ наиболее важных показателей напряженно-деформированного состояния при прокатке слоистого композита АМг3/Д16/АМг3. **Методика исследований.** В качестве основного инструмента для выполнения исследований выбран пакет КЭ-моделирования Deform-3D. **Результаты и обсуждение.** С помощью анализа искажения координатной сетки слоев композита и векторов скоростей течения материала слоев было выявлено, что в процессе прокатки деформация распределяется неоднородно по материалам слоев: наружные слои текут интенсивнее по сравнению со средним слоем. Максимальный разброс интенсивности деформации ϵ_i в поперечном сечении, наблюдаемый при максимальном обжатии 75 %, составляет 12 %, что позволяет принять для аналитических расчетов в первом приближении допущение об однородности деформации. Установлена связь начала формирования соединения между слоями композита с пороговым расширением контактной поверхности и нормальным давлением на межслойной границе. Предложены дальнейшие направления совершенствования подходов моделирования процессов прокатки слоистых композитов.

Для цитирования: Салихьянов Д.Р., Мичуров Н.С. Моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 6–18. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-6-18.

*Адрес для переписки

Салихьянов Денис Ринатович, к.т.н., доцент
Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 28,
620002, г. Екатеринбург, Россия
Тел.: +7 (343) 375-44-37, e-mail: d.r.salikhianov@urfu.ru

Введение

В последние десятилетия слоистые композиты на основе алюминиевых сплавов находят все большее применение в авиакосмической и автомобильной промышленности [1]. Благодаря использованию разных материалов в одном изделии удастся объединить такие свойства, как прочность, коррозионную стойкость, важный для авиации удельный вес, теплопроводность и др.

Слоистые композиты обычно получают совместной прокаткой, в ходе которой происходит металлургическое соединение предварительно подготовленных листов [2]. Технология совместной прокатки включает в себя следующие основные этапы: подготовку соединяемых поверхностей листов посредством химической и механической обработки; сборку листов в пакет и их фиксацию сваркой или клепками; прокатку пакета по заданному режиму; термообработку; отрезку фиксированных краев листа. Далее могут идти операции листовой штамповки, например вырубка и вытяжка [2].

Основная задача совместной прокатки заключается в получении надежного соединения между материалами, характеризуемого прочностью и оцениваемого через специальные испытания [3]. На настоящий момент процесс соединения однородных и разнородных материалов пластической деформацией все еще остается малоизученным явлением. Это подтверждают многочисленные работы, посвященные изучению влияния отдельных технологических факторов совместной прокатки на прочность соединения слоев материала [1–10]. Анализ обзорных [2, 4, 5], экспериментальных [4–10] и теоретических [11, 12] работ показал, что наиболее значимыми факторами совместной прокатки являются следующие: величина обжатий и давлений при прокатке, технология подготовки поверхностей к соединению и соотношение прочностных свойств соединяемых материалов. Ввиду отсутствия надежных моделей прогнозирования условий, при которых начинается соединение материалов, разработка технологий производства новых слоистых композитов сопровождается большим объемом предварительных экспериментальных исследований. Как показано в предыдущей работе автора [3], дополнительные сложности вы-

зывает неодинаковое влияние одних и тех же факторов на процесс соединения материалов, зависящее от сочетания материалов в конкретном технологическом процессе. Например, в одних случаях увеличение шероховатости контактных поверхностей способствует соединению, а в других – наоборот, препятствует.

Для описания механизма соединения однородных и разнородных материалов существует около шести теоретических моделей, описанных в [13], однако наиболее часто ссылаются на теоретическую модель соединения материалов Бэя [14], который описал соединение материалов как процесс, протекающий в четыре стадии: 1) растрескивание оксидных пленок на соединяемых поверхностях материалов слоев; 2) выдавливание чистых металлов в трещины между оксидами; 3) сближение чистых металлов на величину межатомного взаимодействия; 4) образование участков соединения. Ограничениями теоретической модели Бэя являются типичные для механики сплошных сред допущения: двумерная постановка, однородность течения материалов слоев и давлений в очаге деформации и др. Кроме того, модель Бэя не позволяет аналитически определить уровень деформаций и давлений при совместной прокатке, необходимый для начала формирования соединения материалов.

В связи с этим за последнее время большое развитие получили методы конечно-элементного (КЭ) моделирования процессов соединения материалов [15–19]. С опорой на натурные эксперименты возможно воспроизведение условий, при которых происходит формирование соединения материалов. В частности, для анализа процесса соединения материалов интерес представляют такие характеристики, как нормальные давления, сдвиговые напряжения, относительное среднее нормальное напряжение, интенсивность деформации и др. Наиболее подробный КЭ-анализ прокатки алюминиевого композита предоставили Халеди и др. [17, 18], однако ими выполнялось моделирование процесса соединения однородных листов из алюминия, хорошо изученного в экспериментальных работах Бэя [14]. Исследование механизма соединения разнородных материалов представляет собой более сложную задачу, в связи с чем в настоящей работе была поставлена **цель**: установление связи между показателями напряженно-деформиро-

ванного состояния и формированием устойчивого соединения между алюминиевыми сплавами разных составов. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи работы: 1) моделирование процесса прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3 с данными, которые соответствуют физическим экспериментам, выполненным в ИМАШ УрО РАН; 2) выбор и анализ наиболее важных показателей напряженно-деформированного состояния при прокатке слоистого композита АМг3/Д16/АМг3.

Методика исследований

Объектом исследования настоящей работы являлся процесс совместной прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3, состоящего из алюминиевых сплавов Д16 (сплав серии 2xxx, термически и деформационно упрочняемый) и АМг3 (сплав серии 5xxx, деформационно упрочняемый) [20].

В качестве основного инструмента для выполнения исследований выбран пакет КЭ-моделирования Deform-3D. Моделирование процесса прокатки выполнено в соответствии со следующими условиями. В качестве исходных заготовок были приняты листы с размерами

2,92×50×75 мм (толщина × ширина × длина), соответствующие реальным размерам листов, использованных для физического моделирования. Листы из сплавов Д16 и АМг3 поставлялись в отожженном (мягком) состоянии. Кривые упрочнения сплавов были построены с использованием кулачкового пластометра ИМАШ УрО РАН, а затем интегрированы в среду Deform-3D. Получившееся соотношение сопротивлений деформаций сплавов $\frac{\sigma_{Д16}}{\sigma_{АМг3}}$ оказалось близко к 0,8.

Перед прокаткой листы собирались в пакет, как показано на рис. 1. Валки приняты идеально жесткими с линейной скоростью прокатки 150 мм/с, диаметр валков составлял 255 мм. Условия трения приняты в соответствии с законом трения по Кулону с коэффициентом трения μ , равным 0,12, между валками и наружными слоями пакета, и коэффициентом трения μ , равным 0,5, между слоями в пакете. Температура пакета соответствовала комнатной.

Для имитации фиксации листов в пакете при прокатке было принято условие возможности их взаимного проскальзывания без отрыва друг от друга. Опытным путем установлен минимальный размер КЭ заготовок листов, позволяющий

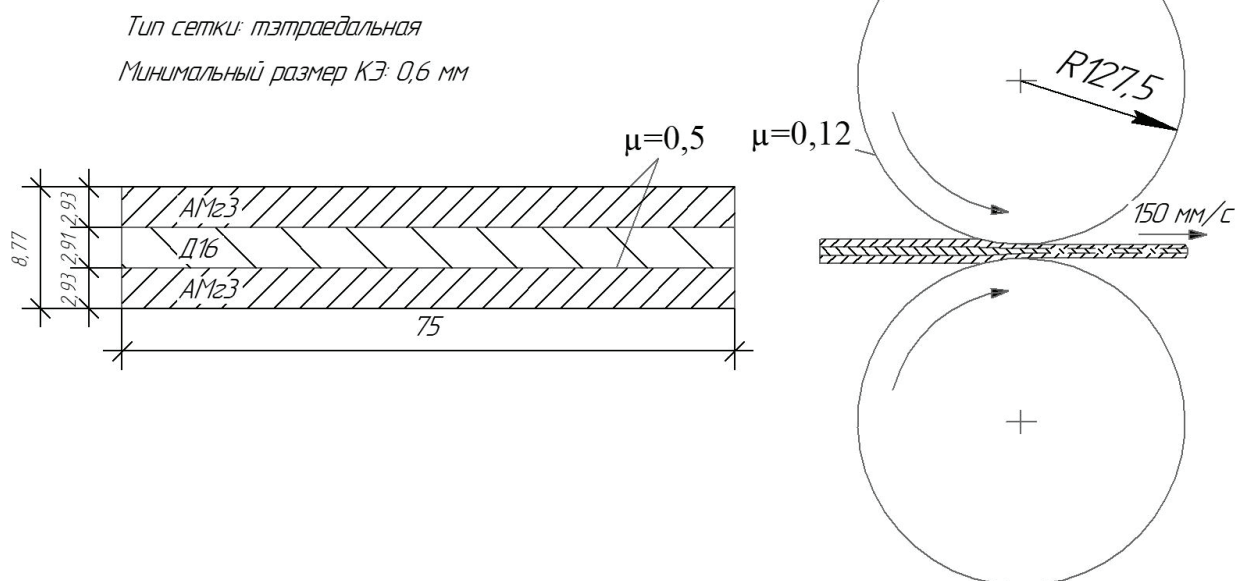


Рис. 1. Постановка задачи 3D-КЭ-моделирования процесса совместной прокатки слоистого композита АМг3/Д16/АМг3

Fig. 1. Setting of the problem of 3D FE-simulation of the laminated composites АМg3/Д16/АМg3 rolling processes

найти сходимость задачи на шагах итераций: минимальный размер КЭ в окне плотности составлял 0,6 мм, минимальный размер КЭ за пределами очага деформации – 1,3 мм, общее количество КЭ составляло ~50 тысяч для каждой листовой заготовки. Таким образом, в очаге деформации приходилось по три КЭ на толщину листа, что можно считать удовлетворительным с точки зрения точности и времени решения.

В процессе моделирования варьировалось обжатие пакета $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%$, где h_0 и h_1 –

исходная и конечная толщина пакета соответственно. Обжатия ε , задаваемые при моделировании, соответствовали реальным и составляли 30, 45, 55, 65 и 75 %. При этом обжатия более 45 % выполнялись в два прохода, где первый проход равнялся 45 %, а второй соответствовал целевому конечному обжатию (от 55 до 75 %). Авторами экспериментально установлено, что соединение между алюминиевыми сплавами происходит при обжатии ε по толщине не менее 45 %. Это наблюдение согласуется с литерату-

рой: например, в [6] установлено, что для соединения листов из технически чистого алюминия требуется обжатие при прокатке не менее 40 %.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, а, б представлено формоизменение координатной сетки, характеризующее течение частиц металла среднего слоя при совместной прокатке с обжатием 45 и 75 % соответственно. Координатная сетка была построена в центральном продольном сечении с размерами ячейки 0,5×0,5 мм. Из формоизменения сетки видно, что при совместной прокатке приповерхностные слои сплава Д16 текут в продольном направлении интенсивнее по сравнению с центральными слоями сплава. При большем обжатии (как, например, показано на рис. 2, б) происходит более сильное вытягивание приповерхностных слоев сплава Д16 по сравнению с центральными.

Как показано на рис. 3, по мере движения металла к выходу из очага деформации происходит искривление поверхности векторов скоростей

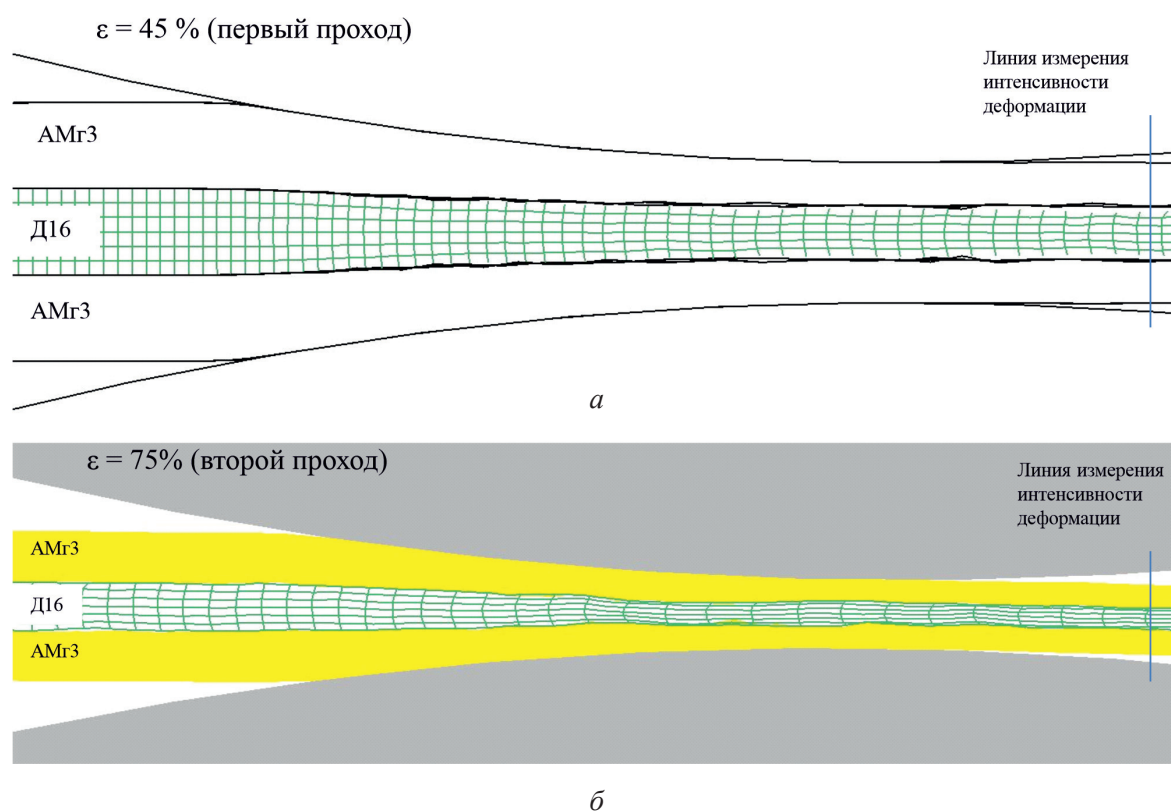


Рис. 2. Формоизменение координатной сетки центрального слоя при прокатке с обжатием 45 % (а) и 75 % (б)

Fig. 2. Shape change of the central layer grid under rolling with thickness reduction ratio of 45 % (a) and 75 % (b)

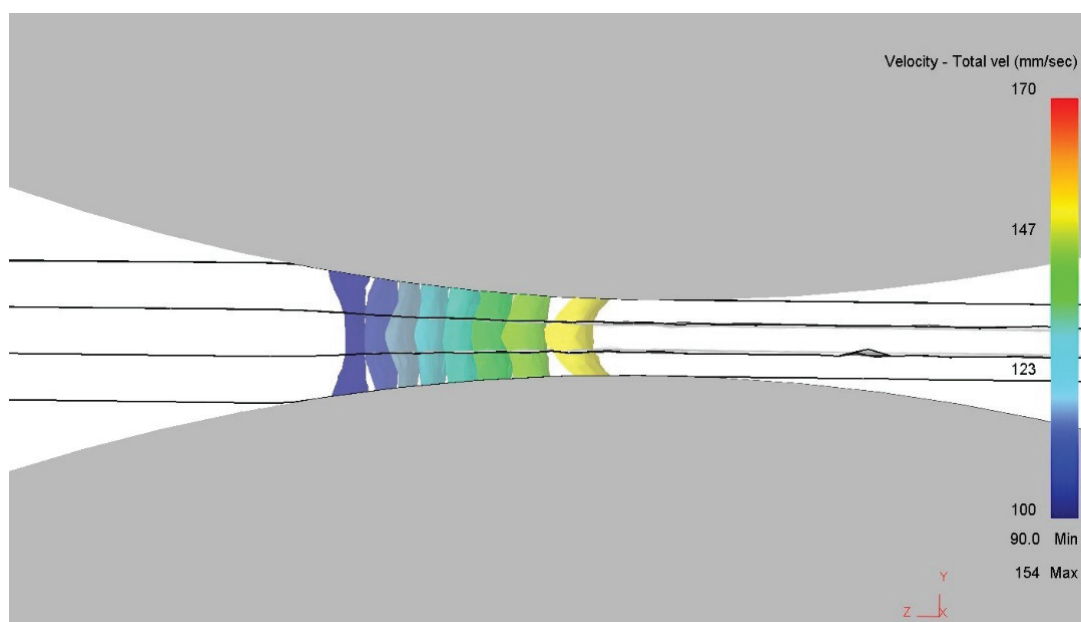


Рис. 3. Поверхности векторов скоростей течения металла слоев при совместной прокатке с обжатием 45 %

Fig. 3. Surfaces of metal flow velocity vectors of layers during accumulative roll bonding with thickness reduction ratio of 45 %

течения металла слоев с отставанием течения центрального слоя из сплава Д16 по сравнению с плакирующими слоями из сплава АМг3. Иными словами, осуществляется вытеснение металла центрального слоя в сторону входа в очаг деформации вследствие его меньшего сопротивления деформации. Исходя из этого, очевидно невыполнение закона постоянства секундных объемов с соответствующим искажением координатной сетки.

Для того чтобы оценить неоднородность деформации в поперечном сечении катаных композитов, было выполнено измерение интенсивности деформации e_i вдоль линии, схематично изображенной на рис. 2. Интенсивность деформации рассчитывалась по формуле

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \quad \text{где}$$

e_1, e_2, e_3 – главные деформации. Конечный результат измерения представлен в виде графика на рис. 4, где по оси абсцисс отложена относительная толщина слоистого композита (0 – нижняя поверхность композита, 1 – верхняя поверхность композита).

На рис. 4 обращает на себя внимание рост неоднородности интенсивности деформации e_i с увеличением обжатий при совместной прокатке. При малом обжатии 30 % неоднородность де-

формации по слоям практически неразличима, а разница между максимальным и минимальным значением составляет 0,02. Далее с увеличением обжатий неоднородность интенсивности деформаций e_i становится более выраженной и достигает максимума при наибольшем обжатии 75 % с разницей между максимальным и минимальным значением, равной 0,17. Примечательно, что при обжатиях до 65 % средний слой композита (сплав Д16) характеризуется меньшими значениями интенсивности деформаций e_i , что согласуется с картиной распределения векторов скоростей течения слоев и выводом об отставании скорости течения центрального слоя от скорости течения плакирующих слоев.

При обжатии 75 % возникает обратная картина: центральный слой характеризуется большими значениями интенсивности деформаций e_i . Это наблюдение, вероятнее всего, вызвано малой толщиной листовой заготовки (2,2 мм) при данном обжатии, что приводит к более интенсивному проникновению деформации вглубь композита. В целом максимальный разброс интенсивности деформации

$$\frac{e_{i(\max)} - e_{i(\min)}}{e_{i(\max)}} \cdot 100 \%,$$

наблюдаемый при обжатии 75 %, составляет 12 %, поэтому для аналитических расчетов технологии производства слоистого композита

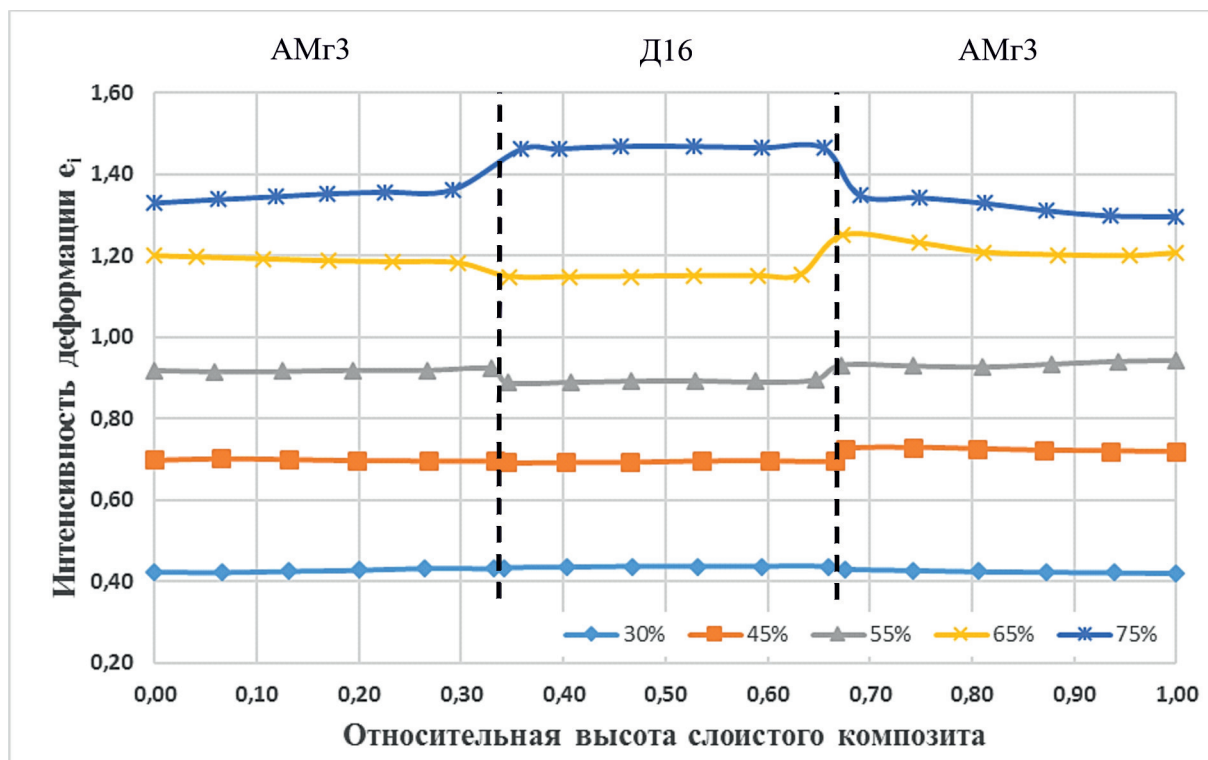


Рис. 4. Распределение интенсивности деформации в поперечном сечении композитов в зависимости от обжатия при прокатке

Fig. 4. Distribution of effective strain in the cross section of composites depending on thickness reduction during rolling

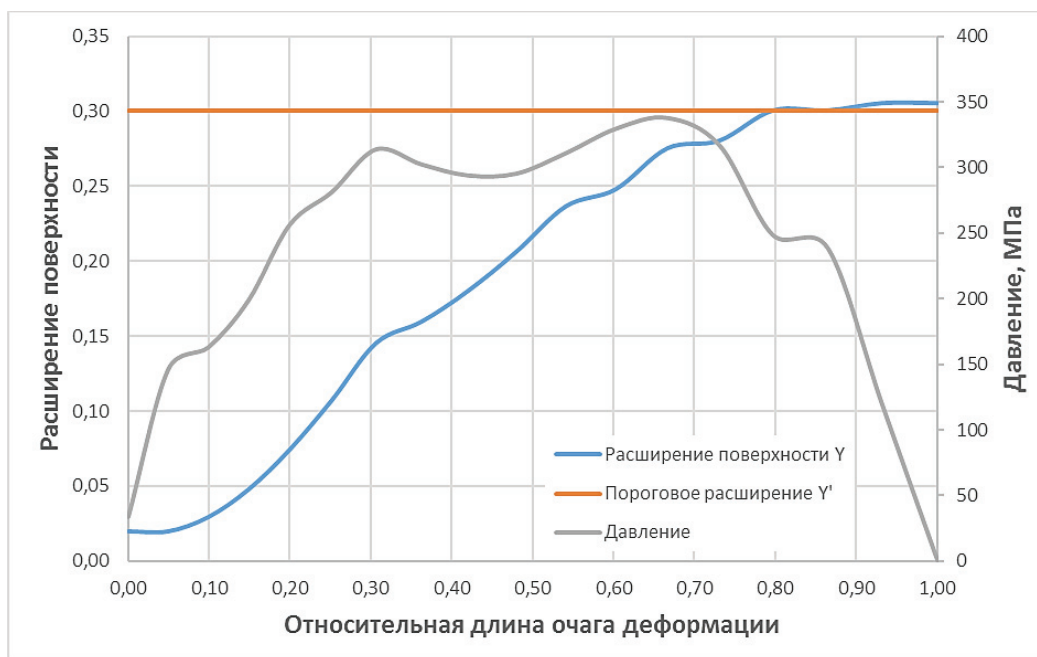
АМг3/Д16/АМг3 в первом приближении можно принять допущение об однородности распределения деформации в поперечном сечении.

С целью изучения условий формирования соединения между слоями из разных материалов для разных вариантов прокатки было рассчитано увеличение площади поверхности и сведено к общепринятому виду $Y = \frac{A_1 - A_0}{A_1}$, где A_0

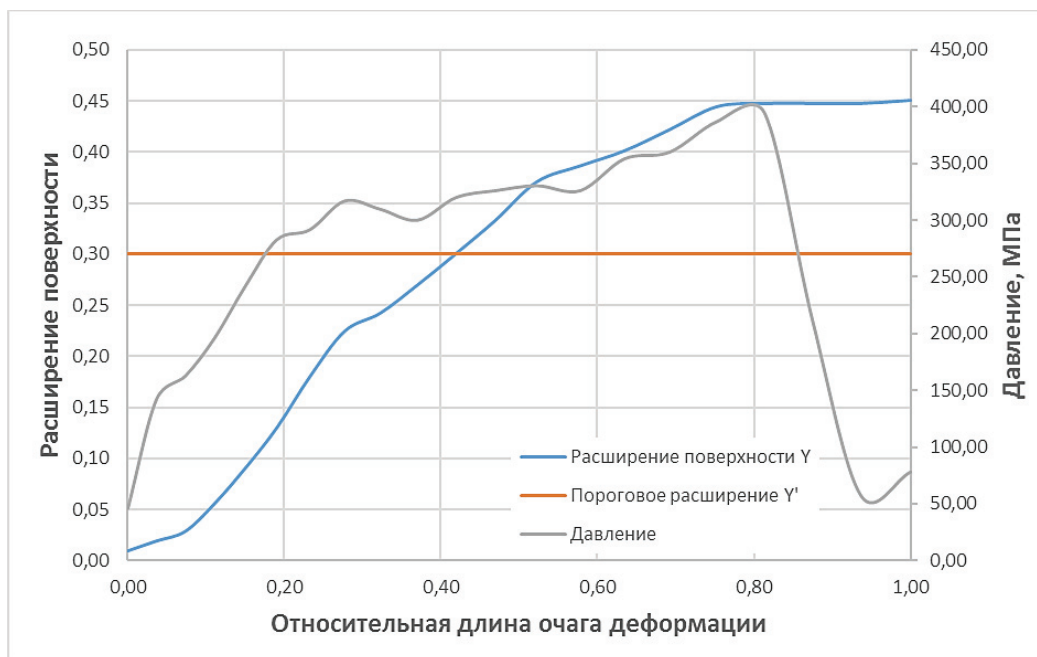
и A_1 – исходная и конечная площади поверхности [14, 21]. Для установления момента начала формирования соединения в очаге деформации был задан граничный критерий Y' , означающий расширение контактной поверхности, при котором появляются трещины в оксидном слое. По данным источников [6, 14, 16–18, 22], посвященных получению алюминиевых композитов прокаткой, критерий Y' может варьироваться от 0,3 до 0,4 для технически чистого алюминия, что эквивалентно приблизительноному обжатию при прокатке 30–40 %. В нашем случае критерий Y' был принят на уровне 0,3 с учетом меньшей пластичности исследуемых сплавов по сравнению с технически чистым алюминием.

На рис. 5 приведен график зависимости расширения контактной поверхности Y на межслойной границе от относительной длины очага деформации, где 0 – вход в очаг деформации, 1 – выход из очага деформации. Дополнительно на этих же графиках показано нормальное давление. Анализ значений расширения поверхности Y на выходе из очага деформации на рис. 5 показывает, что они практически совпадают со значениями обжатий. Это говорит о том, что в данных условиях влияние бокового уширения листов на расширение контактной поверхности Y ничтожно мало и им можно пренебречь для аналитических расчетов.

На рис. 5, а представлен случай прокатки трехслойного пакета АМг3/Д16/АМг3 с обжатием 30 %. Как видно, расширение контактной поверхности пересекает пороговое значение Y' на относительной длине 0,8 очага деформации, соответствующее началу растрескивания оксидного слоя и возможности контакта чистых металлов друг с другом. Однако на участке очага деформации (0,8...1) видно, что нормальные давления интенсивно снижаются с



а



б

Рис. 5. Расширение поверхности и давления на межслойной границе при прокатке композита с обжатием 30 % (а) и 45 % (б)

Fig. 5. Surface expansion and pressure at the interlayer boundary during rolling of composite with reduction ratio of 30 % (a) and 45 % (б)

250 МПа до нуля. Таким образом, максимальное отнесенное давление $\frac{P}{\sigma_{Д16}}$ составляет 1,5,

этого недостаточно для создания контакта между материалами. В реальных условиях прокатки с обжатием 30 % соединения между материалами не происходит, что согласуется с

данными компьютерного моделирования представленного случая.

На рис. 5, б показан график зависимости расширения контактной поверхности и нормального давления от относительной длины очага деформации при прокатке с обжатием 45 %. В этом варианте достижение порогового значения рас-

ширения контактной поверхности Y' происходит на относительной длине очага деформации, равной 0,42. После достижения порогового значения расширение контактной поверхности продолжилось и достигло значения 0,45. На участке очага деформации (0,42...1), соответствующем прокатке с трещинами в оксидном слое, давления продолжили рост с 320 МПа до максимального значения, равного 394 МПа. Отнесенные давления $\frac{P}{\sigma_{D16}}$ на участке очага деформации,

соответствующем прокатке материалов с трещинами в оксидном слое, составляют от 1,6 до 1,97. Поскольку при прокатке с обжатием 45 % в лабораторных условиях образуется первичное соединение материалов, то допустимо считать, что отнесенных давлений от 1,6 до 1,97 достаточно

для выдавливания чистых металлов между трещинами в оксидном слое и сближения их на расстояние действия межатомных сил.

С целью подтверждения результатов компьютерного моделирования на рис. 6 представлены данные микроструктурного исследования слоистых композитов АМг3/Д16/АМг3 после прокатки с обжатием 45 %. На рис. 6, а показано поперечное сечение композита в зоне соединения материалов. Граница соединения представляет собой видимую линию без признаков трещин или разрушения структурных элементов. После прокатки слоистый композит был подвергнут механическому испытанию на сдвиг с целью определения прочности сцепления, которая составила 43 МПа. Результаты механических испытаний композита приведены в таблице.

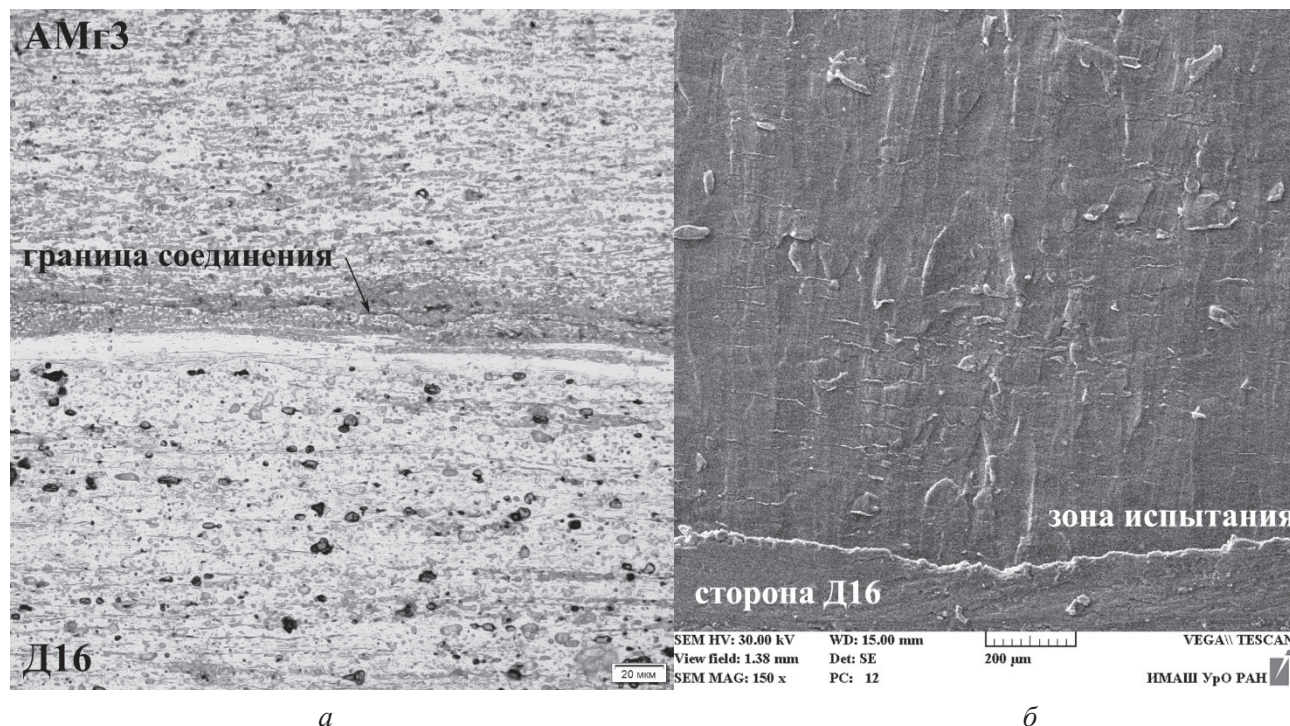


Рис. 6. Поперечное сечение композита АМг3/Д16/АМг3 в зоне соединения (а); зона сдвига со стороны сплава Д16 после испытания на сдвиг (б)

Fig. 6. Cross-section of the AMg3/D16/AMg3 composite in the bond zone (a); shear zone from D16 side after shear test (b)

Механические свойства композита АМг3/Д16/АМг3 после прокатки с обжатием 45 %

Mechanical properties of AMg3/D16/AMg3 composite after rolling with thickness reduction of 45 %

Предел текучести, МПа / Yield stress, MPa	Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa	Относительное удлинение, % / Elongation, %	Прочность сцепления на сдвиг, МПа / Shear bond strength, MPa
279	292	7,2	43

Зона сдвига со стороны сплава Д16 после испытания показана на рис. 6, б, на ней видны характерные «гребни пластической деформации», свидетельствующие о растрескивании оксидных пленок, выдавливании чистых металлов в трещины и образовании первичного соединения. Подобные гребни пластической деформации встречаются также в работах [6, 10], посвященных изучению прочности соединения листов из алюминия и алюминиевых сплавов. На рис. 6, б видно, что гребни пластической деформации расположены перпендикулярно направлению прокатки, следовательно, причиной их появления следует считать растягивающие напряжения, действующие вдоль направления прокатки. Видны отдельные частицы сплава АМгЗ, отслоившиеся в процессе испытания на сдвиг и оставшиеся в зоне соединения со стороны сплава Д16, что свидетельствует о соединении материалов на этих участках.

Исходя из результатов компьютерного и физического моделирования допустимо считать, что при прокатке с обжатием 45 % достигается первичное соединение между материалами слоев. С целью оценки влияния дальнейшего увеличения обжатия при прокатке на прочность со-

единения слоев были исследованы зависимости расширения поверхности Y и максимального давления в очаге деформации $p_{\max}$ от обжатий; результаты сведены на рис. 7. Стоит отметить, что при обжатиях от 0,55 % и больше значения расширения Y несколько меньше значений обжатий, это означает растущую неоднородность деформации по толщине листов.

В целом графики зависимости на рис. 7 демонстрируют монотонное возрастание обоих параметров (расширение поверхности Y и максимальное давление p), что будет способствовать увеличению прочности соединения материалов слоев. Этот вывод согласуется с результатами экспериментальных исследований совместной прокатки алюминия и алюминиевых сплавов [4, 6, 7, 10], где увеличение обжатий приводило к увеличению прочности соединения материалов.

Из полученных данных компьютерного моделирования следует вывод, что максимальную прочность обеспечит следующий технологический маршрут прокатки: обжатие в первом проходе 45 % → обжатие во втором проходе 50 % (общее обжатие достигает 75 %). Полученный результат подтверждается испытаниями на сдвиг композита, полученного через данный маршрут,

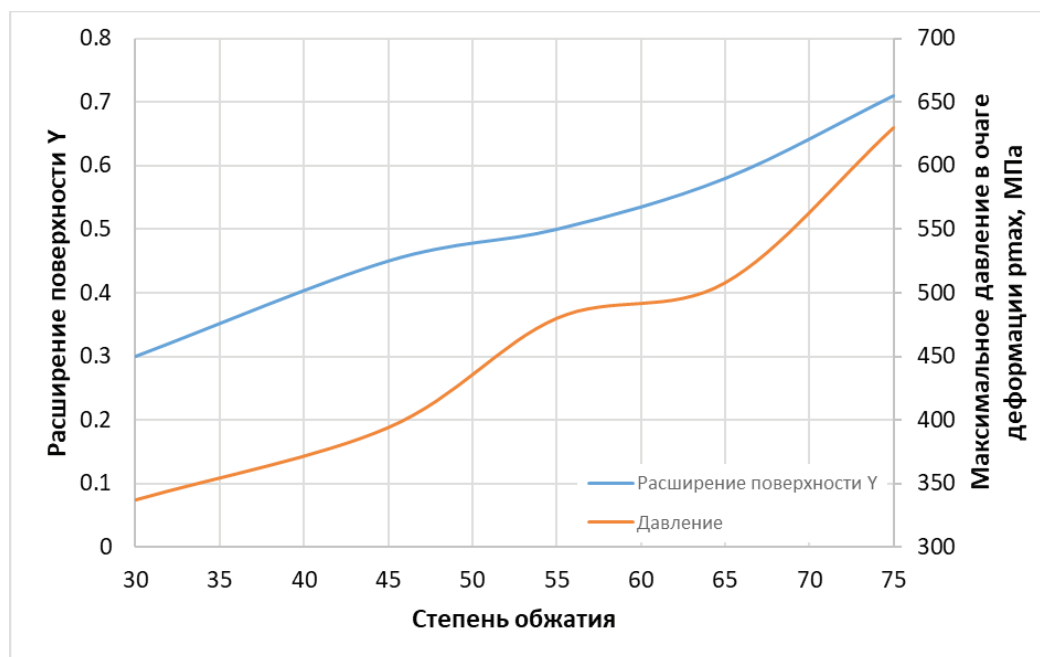


Рис. 7. Зависимость расширения поверхности Y и максимального давления в очаге деформации $p_{\max}$ от обжатий при прокатке

Fig. 7. Dependence of the surface extend Y and the maximum pressure in the deformation zone $p_{\max}$ on rolling reduction ratios



с прочностью сцепления 67 МПа, что в 1,5 раза выше прочности, полученной при первичном соединении слоев композита.

Таким образом, можно отметить, что предложенный подход отражает качественную зависимость прочности соединения от технологических факторов прокатки. Проблема предложенного подхода исследования образования соединения между разнородными материалами заключается в большой сложности установления критерия порогового расширения поверхности Y' , который необходимо определять для каждого вновь разрабатываемого композита. В связи с этим направление будущих исследований должно быть связано с развитием новых моделей процессов прокатки слоистых композитов и разработкой более надежных критериев формирования соединения между разнородными материалами.

Заключение

В работе было выполнено моделирование процесса прокатки слоистого композита АМгЗ/Д16/АМгЗ и оценены параметры напряженно-деформированного состояния, влияющие на формирование соединения между слоями.

Было выявлено, что в процессе прокатки деформация распределяется неоднородно по материалам слоев: наружные слои текут интенсивнее по сравнению со средним слоем. Максимальный разброс интенсивности деформации ϵ_i в поперечном сечении, наблюдаемый при максимальном обжатии 75 %, составляет 12 %, что позволяет принять для аналитических расчетов в первом приближении допущение об однородности деформации.

Установлена связь начала формирования соединения между слоями композита с пороговым расширением контактной поверхности и давлением. При прокатке с обжатием 30 % расширение контактной поверхности достигает порогового значения близко к выходу из очага деформации, в то время как нормальные давления резко падают, что приводит к отсутствию соединения. В случае прокатки с обжатием 45 % расширение контактной поверхности достигает порогового значения на относительном расстоянии от входа в очаг деформации 0,42. На оставшемся участке действуют приведенные

нормальные напряжения от 1,6 до 1,97, достаточные для формирования первичного соединения между сплавами АМгЗ и Д16.

Список литературы

1. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51. – P. 5775–5799. – DOI: 10.1016/j.actamat.2003.08.023.
2. Ghalehbandi S.M., Malaki M., Gupta M. Accumulative roll bonding – A Review // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 3627. – DOI: 10.3390/app9173627.
3. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation // *Comptes Rendus Mecanique*. – 2019. – Vol. 347. – P. 588–600. – DOI: 10.1016/j.crme.2019.07.002.
4. Jamaati R., Toroghinejad M.R. Cold roll bonding bond strengths: review // *Materials Science and Technology*. – 2011. – Vol. 27, iss. 7. – P. 1101–1108. – DOI: 10.1179/026708310X12815992418256.
5. Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2008. – Vol. 9. – P. 023001. – DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
6. Jamaati R., Toroghinejad M.R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 20. – P. 191–197. – DOI: 10.1007/s11665-010-9664-7.
7. Madaah-Hosseini H.R., Kokabi A.H. Cold roll bonding of 5754-aluminum strips // *Materials Science and Engineering A*. – 2002. – Vol. 335. – P. 186–190. – DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01925-6.
8. Heydari Vini M., Sedighi M., Mondali M. Investigation of bonding behavior of AA1050/AA5083 bimetallic laminates by roll bonding technique // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2018. – Vol. 71, iss. 9. – P. 2089–2094. – DOI: 10.1007/s12666-017-1058-1.
9. Heydari Vini M., Daneshmand S., Forooghi M. Roll bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the roll bonding technique // *Technologies*. – 2017. – Vol. 5 (2). – P. 32. – DOI: 10.3390/technologies5020032.
10. Govindaraj N.V., Lauvdal S., Holmedal B. Tensile bond strength of cold roll bonded aluminium sheets // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213. – P. 955–960. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.007.
11. Huang M.N., Tzou G.Y., Syu S.W. Investigation on comparisons between two analytical models of sandwich sheet rolling bonded before rolling // *Journal of*

Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – P. 598–603. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00799-4.

12. *Danesh Manesh H., Karimi Taheri A.* Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 166. – P. 163–172. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.010.

13. An investigation of interface bonding of bimetallic foils by combined accumulative roll bonding and asymmetric rolling techniques / H. Yu, A. Kiet Tieu, Ch. Lu, A. Godbole // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – Vol. 45A. – P. 4038–4045. – DOI: 10.1007/s11661-014-2311-4.

14. Joining by plastic deformation / K.-I. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, A.E. Tekkaya // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 62. – P. 673–694. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.004.

15. A finite element framework for the evolution of bond strength in joining-by-forming processes / M. Bambach, M. Pietryga, A. Mikloweit, G. Hirt // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214. – P. 2156–2168. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.015.

16. *Kebriaei R., Vladimirov I.N., Reese S.* Joining of the alloys AA1050 and AA5754 – Experimental characterization and multiscale modeling based on a cohesive zone element technique // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214. – P. 2146–2155. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.014.

17. Modeling of joining by plastic deformation using a bonding interface finite element / K. Khaledi, Sh. Rezaei, S. Wulfinghoff, S. Reese // *International Journal of Solids and Structures*. – 2019. – Vol. 160. – P. 68–79. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.10.014.

18. *Khaledi K., Brepols T., Reese S.* A multiscale description of bond formation in cold roll bonding considering periodic cracking of thin surface films // *Mechanics of Materials*. – 2019. – Vol. 137. – P. 103142. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103142.

19. *Salikhyanov D., Kamantsev I., Michurov N.* Technological shells in rolling processes of thin sheets from hard-to-deform materials // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. – DOI: 10.1007/s11665-023-07834-4.

20. *Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В.* Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: справочное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 344 с. – ISBN 978-5-321-01755-5.

21. *Bay N.* Mechanisms producing metallic bonds in cold welding // *Welding Research Supplement*. – 1983. – N 5. – P. 137–142.

22. A microscale finite element model for joining of metals by large plastic deformations / K. Khaledi, Sh. Rezaei, S. Wulfinghoff, S. Reese // *Comptes Rendus Mecanique*. – 2018. – Vol. 346. – P. 743–755. – DOI: 10.1016/j.crme.2018.05.005.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Simulation of the rolling process of a laminated composite AMg3/D16/AMg3

Denis Salikhyanov^{1, 2, a, *}, Nikolay Michurov^{2, 3, b}

¹ Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya Str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

³ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 22 Mira Str., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-7235-7111>,  d.r.salikhyanov@urfu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>,  n.michurov@ya.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 April 2023

Revised: 20 May 2023

Accepted: 13 June 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Laminated composites

Aluminum alloys

Accumulative roll bonding

Stress-strain state

Materials bonding

Finite element simulation

Funding

This study was performed in the frame of the grant No. 22-29-20243 “Multi-scale simulation of processes of joining dissimilar materials by plastic deformation” funded by the Russian Science Foundation with the support of the government of Sverdlovsk region.

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Over the past decades, laminated composites based on aluminum alloys have been increasingly used in the aerospace and automotive industries. Laminated composites are usually produced by accumulative roll bonding, which results in the metallurgical bonding of initially prepared sheets. Hence, the main task of accumulative roll bonding is to obtain a reliable bond between materials. However, at present, the process of joining similar or dissimilar materials by plastic deformation is still a poorly understood phenomenon. In this regard, in recent years, methods of finite element modeling of the processes of joining materials have begun to develop intensively. **The purpose of the work** is to establish a relationship between stress-strain state parameters and the formation of a stable bond between aluminum alloys of different compositions. To achieve this goal, the following **tasks** are formulated: 1. Simulation of the laminated composite “AMg3/D16/AMg3” rolling process using data corresponding to physical experiments carried out at the Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2. Selection and analysis of the most important stress-strain state parameters of the laminated composite “AMg3/D16/AMg3” rolling process. **Research methods.** Process simulation system *Deform-3D* was chosen as the main research tool. **Results and Discussion.** An analysis of the coordinate grid distortion and velocity vectors of material flow of layers revealed that the deformation is distributed inhomogeneously in the cross section after rolling: the outer layers flow more intensively compared to the middle layer. The maximum scatter of strain intensity ϵ_i in the cross section, observed at a maximum reduction ratio of 75%, is 12%. This allows one to accept for analytical calculations in the first approximation the assumption of deformation uniformity. A relationship is established between the beginning of the formation of a bond between composite layers and the threshold expansion of the contact surface and normal pressure at the interlayer boundary. In the final part of the study, future directions for improving the approaches of simulation the laminated composites rolling processes are proposed.

For citation: Salikhyanov D.R., Michurov N.S. Simulation of the rolling process of a laminated composite AMg3/D16/AMg3. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 6–18. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-6-18. (In Russian).

References

1. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 5775–5799. DOI: 10.1016/j.actamat.2003.08.023.

* Corresponding author

Salikhyanov Denis R., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Ural Federal University
 named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
 28 Mira Str., Ekaterinburg,
 620002, Russian Federation
 Tel.: +7 (343) 375-44-37, e-mail: d.r.salikhyanov@urfu.ru

2. Ghalehbandi S.M., Malaki M., Gupta M. Accumulative roll bonding – A Review. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, p. 3627. DOI: 10.3390/app9173627.
3. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation. *Comptes Rendus Mecanique*, 2019, vol. 347, pp. 588–600. DOI: 10.1016/j.crme.2019.07.002.
4. Jamaati R., Toroghinejad M.R. Cold roll bonding bond strengths: review. *Materials Science and Technology*, 2011, vol. 27, iss. 7, pp. 1101–1108. DOI: 10.1179/026708310X12815992418256.
5. Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2008, vol. 9, p. 023001. DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
6. Jamaati R., Toroghinejad M.R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, pp. 191–197. DOI: 10.1007/s11665-010-9664-7.
7. Madaah-Hosseini H.R., Kokabi A.H. Cold roll bonding of 5754-aluminum strips. *Materials Science and Engineering A*, 2002, vol. 335, pp. 186–190. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01925-6.
8. Heydari Vini M., Sedighi M., Mondali M. Investigation of bonding behavior of AA1050/AA5083 bimetallic laminates by roll bonding technique. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, vol. 71, iss. 9, pp. 2089–2094. DOI: 10.1007/s12666-017-1058-1.
9. Heydari Vini M., Daneshmand S., Forooghi M. Roll bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the roll bonding technique. *Technologies*, 2017, vol. 5 (2), p. 32. DOI: 10.3390/technologies5020032.
10. Govindaraj N.V., Lauvdal S., Holmedal B. Tensile bond strength of cold roll bonded aluminium sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, pp. 955–960. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.007.
11. Huang M.N., Tzou G.Y., Syu S.W. Investigation on comparisons between two analytical models of sandwich sheet rolling bonded before rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 140, pp. 598–603. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00799-4.
12. Danesh Manesh H., Karimi Taheri A. Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 166, pp. 163–172. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.010.
13. Yu H., Kiet Tieu A., Lu Ch., Godbole A. An investigation of interface bonding of bimetallic foils by combined accumulative roll bonding and asymmetric rolling techniques. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45A, pp. 4038–4045. DOI: 10.1007/s11661-014-2311-4.
14. Mori K.-I., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. Joining by plastic deformation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2013, vol. 62, pp. 673–694. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.004.
15. Bambach M., Pietryga M., Mikloweit A., Hirt G. A finite element framework for the evolution of bond strength in joining-by-forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, pp. 2156–2168. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.015.
16. Kebriaei R., Vladimirov I.N., Reese S. Joining of the alloys AA1050 and AA5754 – Experimental characterization and multiscale modeling based on a cohesive zone element technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, pp. 2146–2155. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.014.
17. Khaledi K., Rezaei Sh., Wulfinghoff S., Reese S. Modeling of joining by plastic deformation using a bonding interface finite element. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 160, pp. 68–79. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.10.014.
18. Khaledi K., Brepols T., Reese S. A multiscale description of bond formation in cold roll bonding considering periodic cracking of thin surface films. *Mechanics of Materials*, 2019, vol. 137, p. 103142. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103142.
19. Salikhyanov D., Kamantsev I., Michurov N. Technological shells in rolling processes of thin sheets from hard-to-deform materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023. DOI: 10.1007/s11665-023-07834-4.
20. Burkin S.P., Babailov N.A., Ovsyannikov B.V. *Soprotivlenie deformatsii splavov Al i Mg* [Deformation resistance of Al and Mg alloys]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2010. 344 p. ISBN 978-5-321-01755-5.
21. Bay N. Mechanisms producing metallic bonds in cold welding. *Welding Research Supplement*, 1983, no. 5, pp. 137–142.
22. Khaledi K., Rezaei Sh., Wulfinghoff S., Reese S. A microscale finite element model for joining of metals by large plastic deformations. *Comptes Rendus Mecanique*, 2018, vol. 346, pp. 743–755. DOI: 10.1016/j.crme.2018.05.005.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Экспериментальные исследования режимов скоростного шлифования рельсов

Андрей Ильиных^{1, а, *}, Александр Пикалов^{2, б}, Владимир Милорадович^{2, в}, Марина Галай^{1, д}

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, 630049, Россия

² Центр инфраструктурных технологий АО «СТМ», Москва, Подкопаевский переулок, д. 4Б, 109028, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-4234-6216>,  asi@stu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-9584-9896>,  pikalov.2023@internet.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0002-8258-5801>,  vmiloradovich@internet.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7897-1750>,  galayms@mail.ru.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923

История статьи:

Поступила: 17 мая 2023

Рецензирование: 29 мая 2023

Принята к печати: 16 июня 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Шлифование рельсов

Абразивная обработка

Режимы шлифования

Железнодорожный путь

Финансирование

Результаты исследований, представленных в статье, получены с использованием мер государственной поддержки на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по теме «Высокопроизводительная технология скоростного шлифования рельсов и оборудование для ее реализации на основе интеллектуальных цифровых модулей», соглашение № 075-11-2022-014 от 08 апреля 2022 г.

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Шлифование рельсов в условиях железнодорожного пути является приоритетным направлением по продлению его жизненного цикла за счет своевременного удаления дефектов на поверхности катания и формирования требуемого поперечного профиля. На сегодняшний день в России используется 14 рельсошлифовальных поездов марки РШП-48. При этом у большинства рельсошлифовальных поездов заканчивается срок эксплуатации. Поэтому разработка принципиально нового рельсошлифовального поезда с повышенной производительностью является актуальной задачей. В СГУПС ведутся работы совместно с Калужским заводом «Ремпутьмаш» по созданию нового рельсошлифовального поезда РШП 2.0. В основу рельсошлифовального поезда РШП 2.0 положена технология скоростного шлифования рельсов, которая основана на повышении рабочей скорости рельсошлифовального поезда за счет увеличения частоты вращения шлифовальных кругов и задания им угла атаки. **Цель работы:** исследование режимов шлифования рельсов на специально разработанной установке УРШ, реализующей технологию скоростного шлифования рельсов за счет увеличения частоты вращения шлифовальных кругов до 5000 об/мин. **Методы исследования.** Контроль частоты вращения шлифовальных кругов производился электронным тахометром ИТ-5-ЧМ «Термит» и лазерным тахометром «Мегеон 18005». Измерение угла атаки шлифовального круга осуществлялось цифровым трехосевым акселерометром-инклинометром АЦт 90. Оценка усилия прижатия шлифовального круга к рельсу проводилась тензорезисторными датчиками М50-0,5-С3. Измерение поперечного профиля головки рельса до и после шлифования и оценку съема металла осуществляли рельсовым профилографом ПР-03. Контроль ширины дорожки шлифования производился штангенциркулем ШЦЦ-I-300-0,01. Шероховатость поверхности образца рельса после механической обработки измерялась портативным прибором TR200. **Результаты и обсуждение.** По результатам исследований на УРШ установлены параметры рабочего оборудования проектируемого рельсошлифовального поезда, реализующего технологию скоростного шлифования рельсов, а также установлено влияние режимов шлифования на формирование параметров качества обработанной поверхности рельса и определены оптимальные значения усилий прижатия шлифовального круга к рельсу.

Для цитирования: Экспериментальные исследования режимов скоростного шлифования рельсов / А.С. Ильиных, А.С. Пикалов, В.К. Милорадович, М.С. Галай // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 19–35. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-19-35.

*Адрес для переписки

Ильиных Андрей Степанович, д.т.н., доцент
Сибирский государственный университет путей сообщения,
ул. Дуси Ковальчук, 191,
630049, г. Новосибирск, Россия
Тел.: +7 (383) 328-04-13, e-mail: asi@stu.ru

Введение

Процесс шлифования рельсов активно применяется на сети российских железных дорог с начала 2000-х годов. Технология зарекомендовала себя как единственная позволяющая продлить жизненный цикл рельса [1, 2]. Реализуется эта технология с применением рельсошлифовальных поездов типа РШП-48, являющихся полной копией швейцарских поездов фирмы Speno (модификации RR) разработки 80-х годов XX века [3]. Основными задачами шлифования рельсов (рис. 1, а) являются создание необходимого профиля рельса для обеспечения наилучшего взаимодействия колеса с рельсом, а также удаление дефектов, которые образуются на поверхности катания рельсов [4–6]. Для обработки сложного профиля рельсов шлифование производится путем наклона шлифовальных кругов под разными углами (рис. 1, б).

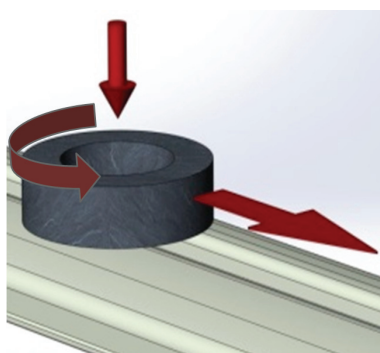
Следует отметить, что рельсошлифовальные поезда, которые эксплуатируются на сети железных дорог, имеют ограничения по скорости до 8 км/ч и по частоте вращения шлифовальных кругов – до 3600 об/мин [3]. При таких параметрах у рельсошлифовальных поездов отмечается низкая производительность, которая обуславливает необходимость закрытия для движения перегонов на время производства работ по шлифованию рельсов, что приводит к значительным финансовым поте-

рям [7]. Таким образом, вопрос повышения производительности рельсошлифовальных поездов является крайне актуальным для развития железнодорожной отрасли.

Всего за все время в России был изготовлен 21 рельсошлифовальный поезд. Начиная с 2021 года в связи с техническим состоянием машин и окончанием срока их эксплуатации началось выбытие рельсошлифовальных поездов из эксплуатации. По состоянию на конец 2022 года на сети железных дорог России работает 14 поездов РШП-48, которые, учитывая их низкую производительность, не обеспечивают потребности железных дорог в шлифовании рельсов.

На основании вышеизложенного холдингом «Синара – Транспортные машины», являющимся единственным поставщиком услуги по шлифованию рельсов для компании ОАО «РЖД», в 2021 году было принято решение о создании принципиально новой машины – рельсошлифовального поезда РШП 2.0 (рис. 2).

В основу работы нового поезда положена технология скоростного шлифования рельсов, которая была разработана в СГУПС в конце 2000-х годов [8] и прошла предварительную промышленную апробацию [9]. Новая технология была предложена исходя из теории резания при абразивной обработке [10–12], в соответствии с которой увеличение рабочей скорости рельсошлифовального поезда невозможно без пропорционального увеличения частоты враще-



а



б

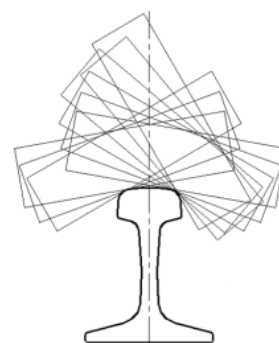


Рис. 1. Схема шлифования рельсов рельсошлифовальным поездом:

а – схема плоского шлифования рельсов торцом круга; б – наклон шлифовальных головок при обработке профиля рельсов

Fig. 1. Schematic representation of rail grinding by a rail grinding train:

а – a schematic representation of flat grinding of rails with the end of the wheel; б – the inclination of the grinding heads when processing the rails' profile



Рис. 2. Рельсошлифовальный поезд РШП 2.0

Fig. 2. Rail grinding train RSHP 2.0

ния шлифовального круга. В противном случае повышение подачи может привести к значительному ухудшению параметров качества обработанной поверхности и уменьшению съема металла, а также возможен повышенный износ абразивного инструмента из-за нарушения оптимальных режимов его работы [13]. Таким образом, в технологии скоростного шлифования были реализованы следующие условия.

Первое условие заключается в том, что абразивный круг располагается под углом α к поверхности обрабатываемого рельса (рис. 3) с раскрытием навстречу направлению движения рельсошлифовального поезда (угол атаки). Благодаря такому расположению шлифовального круга достигается равномерный припуск между абразивными зернами, при этом уменьшается износ абразивного инструмента. Наибольшая эффективность при обработке шлифованием

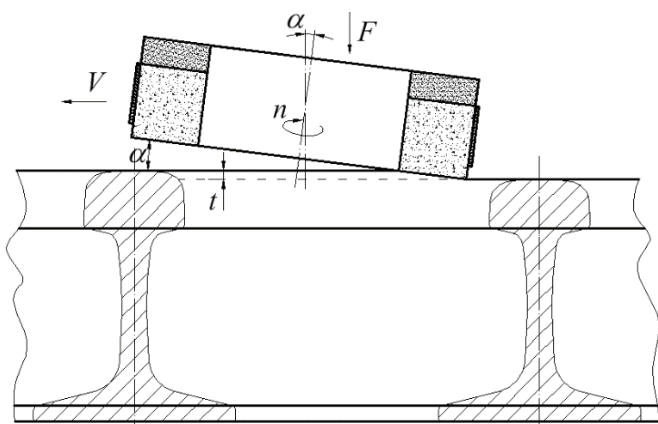


Рис. 3. Схема взаимодействия абразивного инструмента с рельсом при скоростном шлифовании

Fig. 3. Schematic representation of interaction of an abrasive tool with a rail during high-speed grinding

рельсов достигается при правильном выборе угла α , поскольку его величина зависит от съема металла. Угол α принят с учетом размеров шлифовального круга и среднего значения предполагаемого съема металла, он составляет 0,35 градуса в соответствии с формулой

$$\sin \alpha = \frac{t}{(D - d) / 2} = \frac{0,3}{(250 - 150) / 2} = 0,006,$$

где t – предполагаемый съем металла, мм ($t = 0,3$ мм); D – наружный диаметр шлифовального круга, мм ($D = 250$ мм); d – внутренний диаметр шлифовального круга, мм ($d = 150$ мм).

Второе условие заключается в увеличении скорости вращения шлифовального круга. Увеличение скорости вращения приводит к повышению скорости съема металла, а также уменьшается сила резания при той же глубине резания. Предварительно установлено, что повышение частоты вращения шлифовального круга до 5000 об/мин позволит увеличить рабочую скорость рельсошлифовального поезда до 15 км/ч без уменьшения съема металла [9].

Практическое применение принятых технологических решений требует отработки режимов шлифования, которые должны лечь в основу проектирования нового рабочего оборудования рельсошлифовального поезда.

Постановка задач исследований

В настоящее время Калужским заводом «Ремпутьмаш» совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения ведется конструкторская проработка нового рельсошлифовального поезда. В рамках технического проекта закладываются соответствующие характеристики всех систем управления процессом шлифования рельсов, которые зависят от реализуемых режимов работы рельсошлифовального поезда.

Работа рельсошлифовальных поездов характеризуется принципиальными отличиями от шлифования на станках в стационарных условиях [14]. Шлифование рельсов проводится за счет силового замыкания кинематической пары «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 4). Каждый отдельный шлифовальный круг прижимается к головке рельса

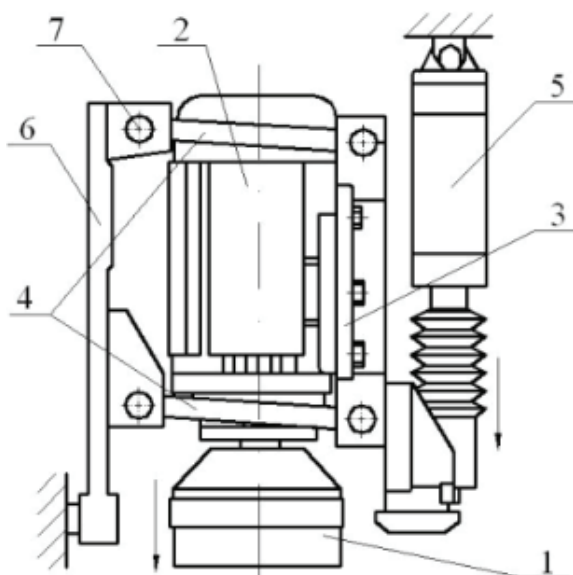


Рис. 4. Схема крепления шлифовальной головки:

1 – абразивный круг; 2 – электродвигатель; 3 – подмоторная плита; 4 – параллелограммная подвеска; 5 – пневмоцилиндр; 6 – плита блока; 7 – ось

Fig. 4. Grinding head attachment pattern:

1 – abrasive wheel; 2 – electric motor; 3 – under-engine plate; 4 – parallelogram suspension; 5 – pneumatic cylinder; 6 – block plate; 7 – axis

пневмоцилиндром через приводной электродвигатель, закрепленный на подмоторной плите. Оси вращения параллелограммной подвески закреплены на торцевой плите блока шлифовальной тележки. Такая конструкция обеспечивает постоянную перпендикулярность оси вращения круга относительно продольной оси рельса. При этом усилие прижатия шлифовального круга к рельсу определяется давлением в пневмоцилиндре, которое автоматически регулируется в зависимости от токовой нагрузки на обмотках электродвигателя в соответствии с принципиальной схемой, представленной на рис. 5.

Указанная особенность процесса шлифования рельсов не позволяет точно реализовывать глубину резания, поскольку съем металла будет формироваться самопроизвольно в зависимости от ряда факторов и с большой долей вероятности будет отличаться от заданного значения. Соответственно нарушится точность формирования профиля рельса [15, 16], а также изменятся условия работы абразивного инструмента [17, 18] и обеспечения качества обработанной поверхности. С целью минимизации отклонений фактического съема металла от заданного (пред-

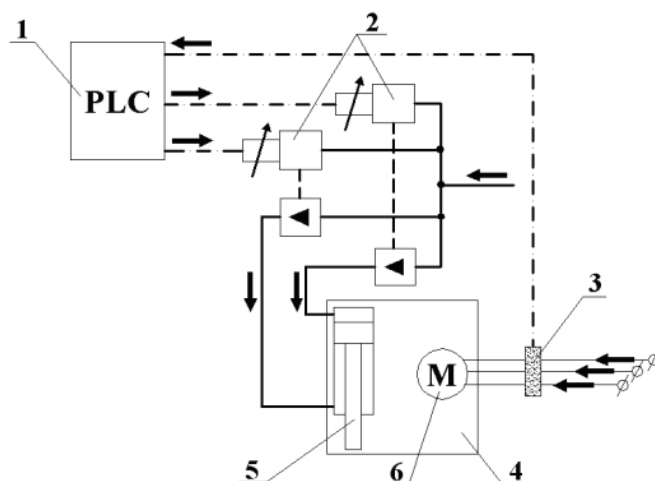


Рис. 5. Общая схема управления усилием прижатия шлифовального круга:

1 – блок управления режимами шлифования; 2 – пропорциональный клапан; 3 – преобразователь регулировочного блока; 4 – шлифовальный блок; 5 – пневмоцилиндр; 6 – электродвигатель привода шлифовального круга

Fig. 5. The pressing force of grinding wheel common control circuit:

1 – grinding modes control unit; 2 – proportional valve; 3 – converter of the adjusting block; 4 – grinding block; 5 – pneumatic cylinder; 6 – grinding wheel drive motor

полагаемого), для которого устанавливаются соответствующие скорость резания и подача, требуется получение эмпирических зависимостей работы всей технологической системы, позволяющих производить дальнейшее проектирование технологических процессов шлифования рельсов для различных условий.

На основании вышеизложенного основной целью проведенных исследований являлось определение оптимальных режимов шлифования рельсов при реализации технологии скоростного шлифования, обеспечивающих максимальную производительность механической обработки с формированием заданных параметров качества обработанной поверхности головки рельса, а также определение основных параметров работы технологического оборудования РШП 2.0, характерных для этих режимов, таких как давление в пневмосистеме прижатия шлифовального круга и токовая нагрузка шлифовальных электродвигателей.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

– определение параметров работы пневмосистемы, обеспечивающих требуемые усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;

- установление зависимости токовой нагрузки в обмотках электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;
- определение номинальной токовой нагрузки электродвигателя заданным средним значениям усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;
- оценка съема металла и шероховатости обработанной поверхности при различных режимах шлифования.

Методика исследований

В настоящее время существует ряд испытательных стендов [19, 20], на которых можно реализовать программу исследовательских испытаний технологии шлифования рельсов. При этом следует отметить, что все имеющиеся на сегодняшний день установки ограничены штатными режимами работы существующих рельсошлифовальных поездов и не позволяют их изменять в достаточно широком диапазоне.

Для выполнения поставленных задач исследования технологии скоростного шлифования рельсов была разработана и изготовлена специальная рельсошлифовальная установка – УРШ.

УРШ состоит из отдельного участка пути длиной 100 м со стандартной колеей 1520 мм (рис. 6, а), по которому перемещается рельсошлифовальная тележка (рис. 6, б). Тележка приводится в движение при помощи привода лебедочного типа, содержащего двигатель, передачу (муфта, тормоз, редуктор одноступенчатый) и барабан с однослойной навивкой (рис. 6, в). В качестве источника энергии используется дизель-генераторная установка (ДГУ) мощностью 200 кВт (рис. 6, г). Работа УРШ в режиме испытаний автоматическая, контролируется системой управления и управляется с персонального компьютера.

Для шлифования используются стандартные рельсы Р50, Р65, Р75, которые устанавливаются по оси пути. При этом уровень головки рабоче-



а



б



в



г

Рис. 6. Общий вид УРШ:

а – участок пути; б – рельсошлифовальная тележка; в – привод; г – ДГУ

Fig. 6. General view of the URSH:

а – section of the railway track; б – rail grinding trolley; в – drive; г – DGS

го рельса (испытательного образца) совпадает с уровнем головки рельса стандартного пути. Закрепление рельса происходит на специальных кронштейнах с возможностью его быстрой смены и возможностью устанавливать рабочий рельс с имитацией различных дефектов реального пути. На рис. 7 представлена схема узла крепления рабочего рельса к стандартному пути.

Рельсошлифовальная тележка представляет собой несамohодную конструкцию на колесах (рис. 8, а) для перемещения по рельсовому пути стандартной колеи. Тележка состоит из основ-

ной рамы, рамы поперечного смещения и рамы поперечного наклона. На основной раме расположена мобильная компрессорная станция для питания пневмоцилиндра прижатия шлифовального круга к рабочему рельсу. На шлифовальной тележке реализована система управления шлифовальной головкой, как на рельсошлифовальном поезде, в соответствии со схемами на рис. 4 и 5 (рис. 8, б).

Рама поперечного наклона с установленным на ней механизмом позволяет обеспечить возможность наклона рамы шлифовального узла

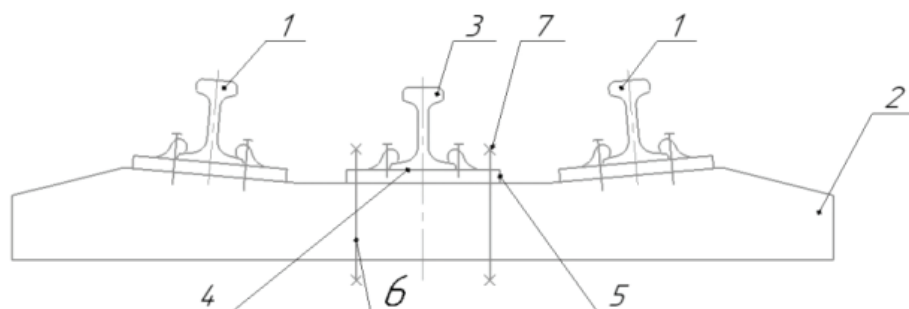


Рис. 7. Узел крепления рабочего рельса:

1 – рельс для перемещения шлифовальной тележки; 2 – шпала; 3 – испытательный образец (рабочий рельс); 4 – проставка; 5 – подкладка; 6 – крепежные шпильки; 7 – гайка

Fig. 7. Mounting unit of the working rail:

1 – rail for moving the sanding trolley; 2 – sleeper; 3 – test sample (working rail); 4 – spacer; 5 – lining; 6 – mounting studs; 7 – nut



а



б

Рис. 8. Устройство шлифовальной тележки:

а – шлифовальная тележка с рамой поперечного смещения; б – шлифовальная люлька с установленной шлифовальной головкой и возможностью поперечного наклона

Fig. 8. Sanding trolley device:

а – grinding trolley with transverse displacement frame; б – a grinding cradle with an installed grinding head and the possibility of transverse inclination

(электродвигателя с кругом) в диапазоне $-20...+70^\circ$ в соответствии со схемой (см. рис. 1, б). Наклон осуществляется при помощи шагового двигателя и передачи «винт – гайка», точность установки требуемого угла составляет $\pm 0,5^\circ$, она обеспечивается кинематикой самой передачи.

В качестве привода шлифовального круга используется штатный электродвигатель РШП, модернизированный для возможности реализации частоты вращения вала 5000 об/мин с моментом на валу электродвигателя, необходимым для обеспечения работы шлифовального круга. Была выполнена следующая модернизация:

1) увеличение номинальной частоты вращения подшипников качения с 4000 до 6700 об/мин за счет замены марки подшипника качения;

2) изменение схемы намотки статора с треугольника (440 В, 60 Гц) на звезду (380 В, 50 Гц) с целью дальнейшего соединения обмоток статора в треугольник для обеспечения повышенной мощности на валу электродвигателя. Фактические расчетные технические характеристики модернизированных шлифовальных электродвигателей представлены в табл. 1.

Рама шлифовального блока устанавливается на осях в подвижной раме поперечного смещения. В раме располагается рычажный механизм с пневматическим приводом, обеспечивающим прижатие шлифовального круга с требуемым

усилием до 3 кН. Механизм также позволяет установить угол атаки шлифовального круга $0,35^\circ$.

Прижатие шлифовального круга к обрабатываемой поверхности рельса осуществляется на основе разности давлений в штоковой и поршневой полостях пневмоцилиндра. Регулировка давлений в полостях пневмоцилиндра осуществляется пропорциональным регулятором давления на основе данных о токовой нагрузке в обмотках шлифовального электродвигателя.

В соответствии с ранее установленными характеристиками технологического процесса скоростного шлифования рельсов УРШ имеет следующие технические характеристики:

– диапазон изменения частоты вращения шлифовального круга – от 3600 до 5000 об/мин;

– диапазон изменения скорости перемещения тележки – от 4 до 30 км/ч;

– диапазон изменения угла наклона шлифовального электродвигателя – от $+20$ до -60° от вертикали;

– угол атаки шлифовального круга составляет $0,35^\circ$ и обеспечивается с раскрытием навстречу рабочему движению тележки;

– диапазон изменения усилия прижатия шлифовального круга к рельсу – от 0 до 5 кН без учета массы шлифовального электродвигателя.

УРШ укомплектовано специальным устройством для тарировки усилия прижатия шлифо-

Таблица 1

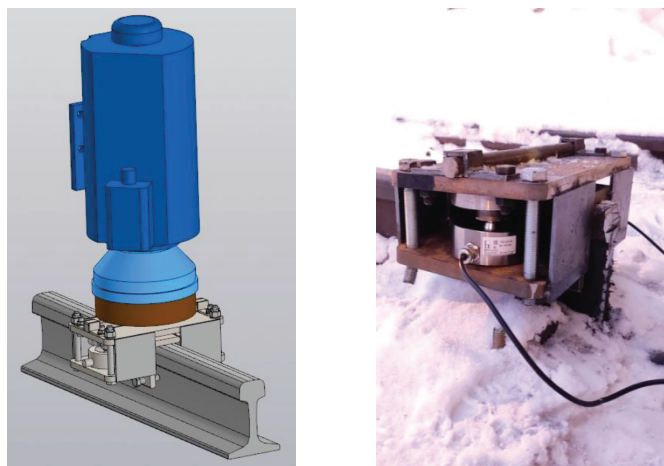
Table 1

Технические характеристики модернизированных электродвигателей

Technical characteristics of modernized electric motors

Схема включения	Режим	Частота тока, Гц	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Момент на валу, Н·м	Мощность, кВт
Δ	Холостой ход	85	254	24	5100	0	0
	Номинальный режим	85	254	45	5029	49,8	26,2
	Увеличение момента в 1,15 раза от номинального	85	254	56	5019	57,3	30,1
	Увеличение момента в 1,5 раза от номинального	85	254	66	4994	74,7	39,1
	Увеличение момента в 1,63 раза от номинального	85	254	70	4985	81,2	42,4
	Увеличение момента в 2 раза от номинального	85	254	80	4958	99,6	51,7

вального круга к рельсу (рис. 9). Устройство позволяет определять фактическую силу прижатия шлифовального круга к рельсу (в ньютонах) в зависимости от токовой нагрузки в обмотках электродвигателя. Эта зависимость в дальнейшем используется для определения фактических сил резания при работе по значениям токовых нагрузок электродвигателя. Измерение усилия прижатия шлифовального круга к рельсу осуществляется посредством двух датчиков силы.



а

б

Рис. 9. Устройство для тарировки усилия прижатия шлифовального круга к рельсу:

а – 3D-модель устройства; б – общий вид устройства

Fig. 9. Device for calibrating the pressing force of grinding wheel to rail:

а – 3D-model of the device; б – general view of the device

С учетом требований к скоростным шлифовальным кругам [21] исследования технологии скоростного шлифования рельсов осуществлялись с применением шлифовальных кругов «Махаон», рассчитанных на максимальную скорость шлифования 75 м/с (5000 об/мин). Испытания проводились с углом атаки шлифовального круга $0,35^\circ$ на частотах вращения 5000 об/мин. Шероховатость обработанной поверхности оценивалась по параметру R_a .

При проведении исследований использовались следующие средства измерения. Контроль частоты вращения шлифовального круга в процессе шлифования производился электронным тахометром ИТ-5-ЧМ «Термит» и лазерным тахометром «Мегеон 18005». Установка поперечных углов наклона шлифовального электродвигателя и угла атаки шлифовального круга

осуществлялась в соответствии с измерениями цифровым трехосевым акселерометром-инclinометром АЦт 90. Усилие прижатия шлифовального круга к рельсу определялось при помощи тензорезисторного датчика М50-0,5-СЗ, а соответствующее давление в пневмосистеме контролировалось с помощью преобразователей давления ОВЕН ПД100И-ДИ1,6-111-0,5. Для измерения поперечного профиля головки рельса до и после шлифования и оценки съема металла после механической обработки использовался профилограф рельсовый ПР-03. Контроль ширины дорожки шлифования производился штангенциркулем ШЦЦ-I-300-0,01. Шероховатость поверхности образца рельса после механической обработки измерялась портативным прибором TR200.

Результаты и их обсуждение

Перед проведением исследований была выполнена настройка электропривода шлифовальной головки, в ходе которой установлена зависимость токовой нагрузки в обмотках электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу.

Для определения параметров пневмосистемы, обеспечивающих требуемое усилие прижатия шлифовального круга к рельсу, и оценки его влияния на режимы работы скоростного электропривода была установлена зависимость силовых параметров от давления в пневмосистеме прижатия шлифовального круга к рельсу (рис. 10).

Из графика (рис. 10) видно, что чем больше давление в пневмосистеме прижатия, тем больше усилие прижатия шлифовального круга к рельсу. При этом установлено, что номинальная сила прижатия реализуется при давлении в пневмосистеме до 0,2 МПа независимо от частоты вращения шлифовального круга.

По результатам испытаний получена зависимость изменения токовой нагрузки в обмотках статора электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу. Графически эта зависимость представлена на рис. 11.

На графике (рис. 11) видно, что изменение токовой нагрузки в обмотках статора электродвигателя имеет линейную зависимость от сил, возникающих при шлифовании. При этом установлено, что испытываемому электроприводу

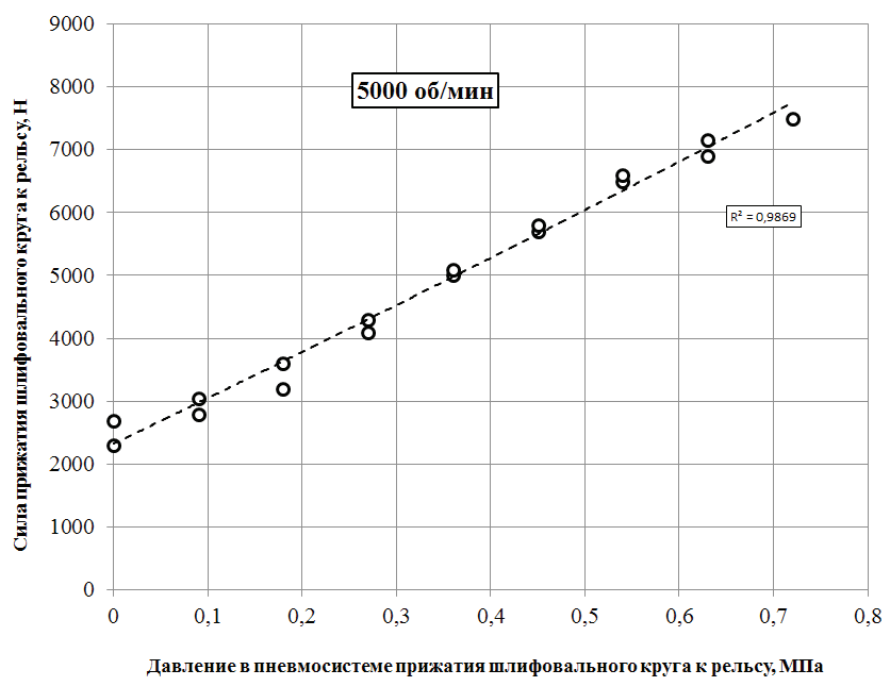


Рис. 10. Зависимость усилия прижатия шлифовального круга к рельсу от давления в пневмосистеме прижатия

Fig. 10. Dependence of the pressing force of grinding wheel to rail on pressure in the pneumatic pressing system

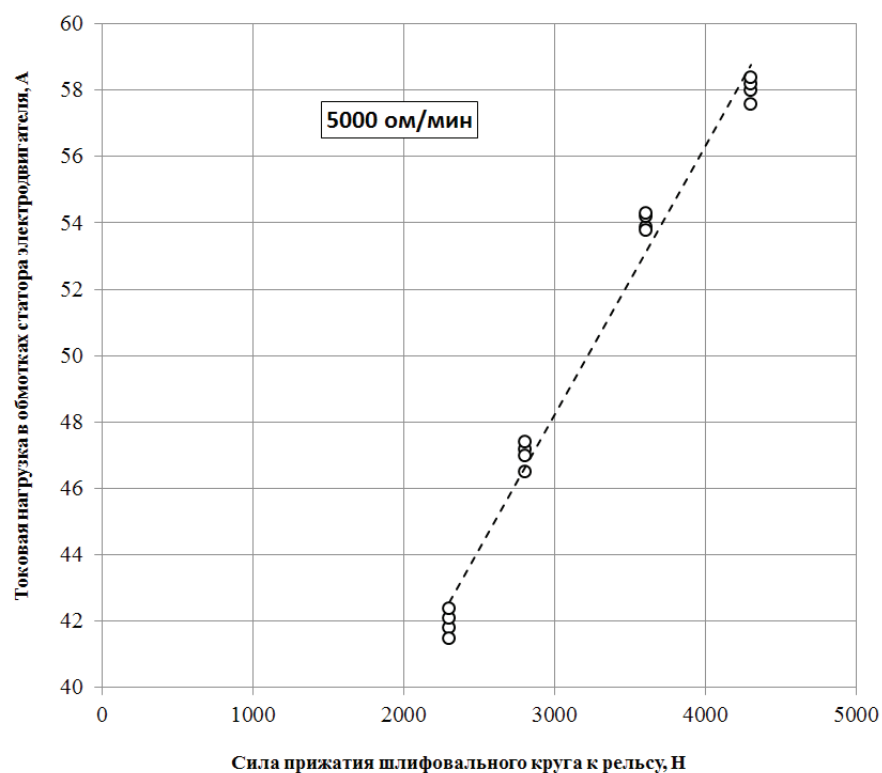


Рис. 11. Зависимость изменения токовой нагрузки в обмотках статора электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу

Fig. 11. Dependence of current load change in the stator windings of the electric motor on the force of pressing the grinding wheel to rail

для обеспечения расчетного диапазона номинальной токовой нагрузки 45 А (см. табл. 1) требуется обеспечение усилия прижатия шлифовального круга к рельсу в диапазоне 2500–2800 Н.

Полученные зависимости позволяют регулировать усилие прижатия шлифовального круга к рельсу и обеспечивать номинальные режимы работы скоростного шлифовального электропривода.

Для обеспечения требуемых режимов скоростного шлифования рельсов усилие прижатия

шлифовального круга к рельсу может варьироваться в диапазоне от 0,8 до 1,2 от номинального значения токовой нагрузки (45 А). То есть технологические режимы работы скоростного электропривода по токовой нагрузке составляют от 37 до 53 А, чему соответствует диапазон усилий прижатия шлифовального круга к рельсу 2200–3100 Н.

Результаты испытаний технологии скоростного шлифования рельсов представлены в табл. 2. Графически результаты испытаний представлены на рис. 12–15.

Таблица 2

Table 2

Данные по испытаниям технологии скоростного шлифования рельсов

Test results of high-speed rail grinding technology

№ прохода	Скорость перемещения шлифовальной тележки, км/ч	Частота вращения шлифовального круга, об/мин	Угол поперечного наклона шлифовального электропривода, град	Усилие прижатия шлифовального круга по токовой нагрузке, А	Фактическое усилие прижатия шлифовального круга, Н	Съем металла, мм	Средний съем металла, мм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Наличие прижогов (+/–)
1	10	5000	–60	51	2706	0,41	0,37	5,8	+
2		5000	–40	51	2704	0,4		5,4	+
3		5000	–20	53	2785	0,37		4,5	+
4		5000	0	55	2827	0,35		4,4	–
5		5000	10	55	2835	0,34		4,8	–
6		5000	20	53	2788	0,32		4,6	–
7	15	5000	–60	51	2712	0,49	0,28	6,2	+
8		5000	–40	51	2710	0,36		5,5	+
9		5000	–20	53	2786	0,25		4,6	–
10		5000	0	55	2832	0,19		3,2	–
11		5000	10	55	2836	0,21		3,8	–
12		5000	20	53	2790	0,20		4,8	–
13	20	5000	–60	51	2706	0,33	0,20	6,6	–
14		5000	–40	51	2704	0,28		5,8	–
15		5000	–20	53	2785	0,22		4,5	–
16		5000	0	55	2827	0,18		3,1	–
17		5000	10	55	2835	0,09		4,2	–
18		5000	20	53	2788	0,12		5,1	–

№ прохода	Скорость перемещения шлифовальной тележки, км/ч	Частота вращения шлифовального круга, об/мин	Угол поперечного наклона шлифовального электродвигателя, град	Усилие прижатия шлифовального круга по токовой нагрузке, А	Фактическое усилие прижатия шлифовального круга, Н	Съем металла, мм	Средний съем металла, мм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Наличие прижогов (+/-)
25	30	5000	-60	51	2701	0,21	0,11	7,1	-
26		5000	-40	51	2698	0,19		5,7	-
27		5000	-20	53	2783	0,11		4,9	-
28		5000	0	55	2819	0,05		3,6	-
29		5000	10	55	2821	0,07		5,0	-
30		5000	20	53	2785	0,03		5,3	-

Из графика (рис. 12) видно, что максимальный съем металла достигается на максимальных углах наклона шлифовальной головки, где ширина дорожки шлифования минимальна.

Влияние продольной подачи шлифовального круга (скорости перемещения шлифовальной

тележки) на съем металла можно увидеть на рис. 13. С увеличением продольной подачи разница в значениях съема металла увеличивается, что отражено на графике. Для частоты вращения шлифовального круга 5000 об/мин скорость перемещения шлифовальной тележки в 15 км/ч

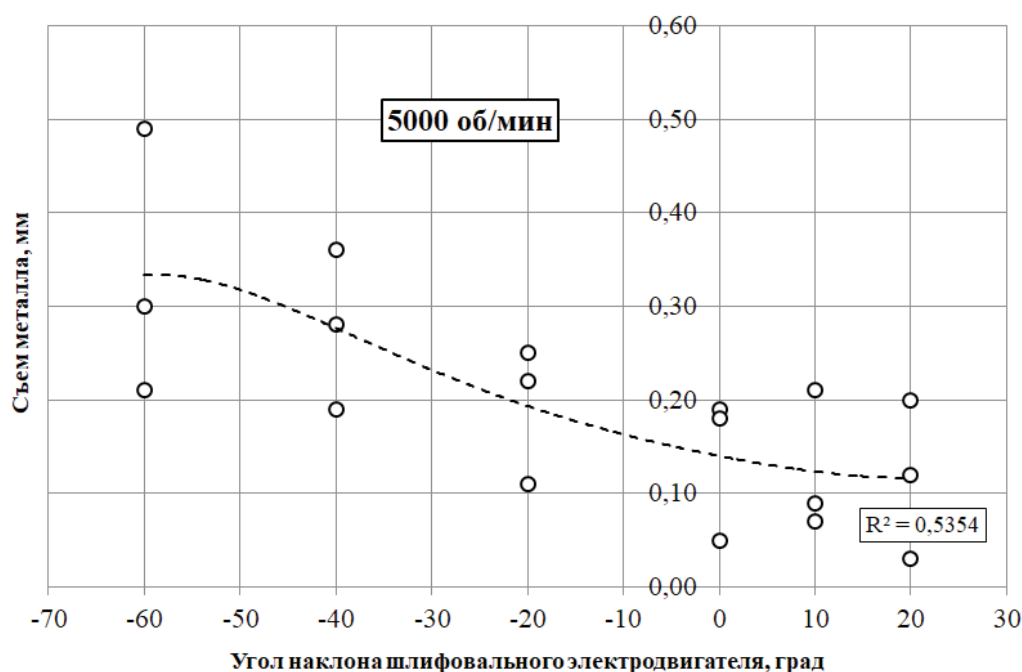


Рис. 12. Съем металла по углам наклона шлифовального электродвигателя

Fig. 12. Removal of metal at the angles of inclination of grinding motor

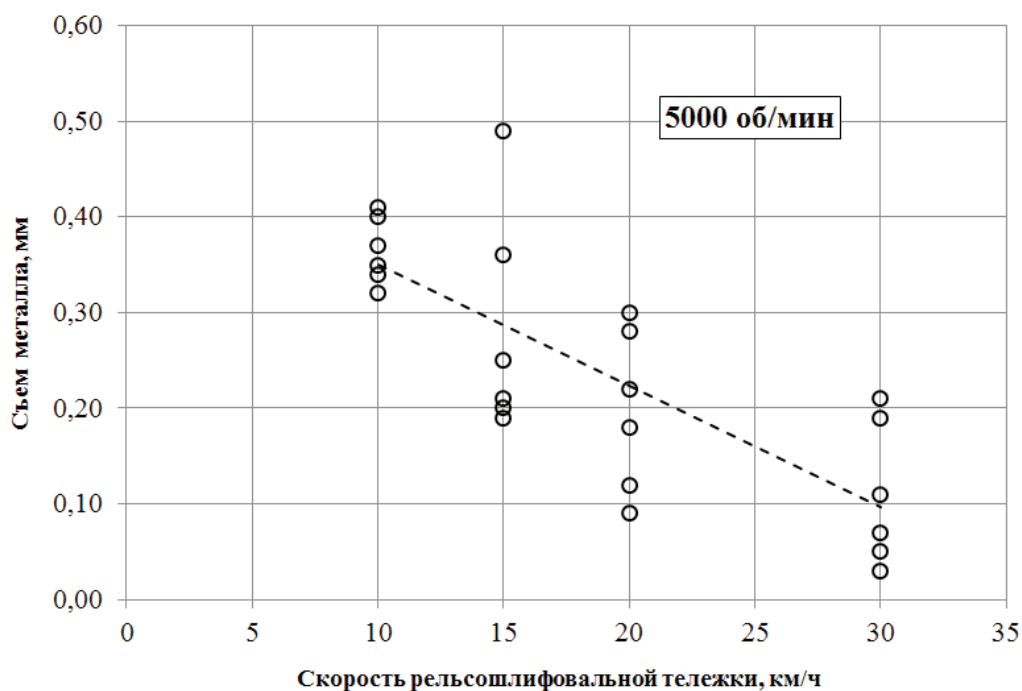


Рис. 13. Зависимость съема металла от режимов шлифования

Fig. 13. Dependence of metal removal on grinding modes

является предельной, после чего с увеличением продольной подачи начинается снижение съема металла. На графике (рис. 13) также можно увидеть, что при 5000 об/мин достижение целевого показателя по съему металла в 0,2 мм возможно на скоростях движения РШП, не превышающих 20 км/ч. Аппроксимируя полученные данные по средним значениям съема металла, можно сделать вывод о возможных режимах работы РШП при скоростном шлифовании по критерию производительности: 5000 об/мин – 15 км/ч; 6000 об/мин – 20 км/ч; 6500 об/мин – 25 км/ч и 7000 об/мин – 30 км/ч.

Приведенные значения справедливы при номинальных значениях усилия прижатия шлифовального круга к рельсу для диапазона токовых нагрузок в обмотках электродвигателя 37–53 А. В дальнейшем при испытаниях опытных образцов электродвигателей промышленного производства эти зависимости требуют уточнения.

Оценка качества отшлифованной поверхности по параметру шероховатости (рис. 14) показала, что характер полученной кривой аналогичен зависимости съема металла по углам наклона шлифовального электродвигателя (рис. 12). Это закономерно, поскольку чем больше угол наклона шлифовального электродвигателя, тем меньше ширина дорожки шлифования,

а удельная нагрузка на единичное зерно больше. Как следствие, внедрение абразивного зерна в обрабатываемую поверхность больше, что дает больший съем металла и соответственно шероховатость поверхности.

Влияние скорости перемещения шлифовальной тележки на формируемую шероховатость поверхности можно увидеть на графике, представленном на рис. 15. На графике видно, что с увеличением рабочей скорости движения шероховатость поверхности возрастает. Это происходит также вследствие влияния количества абразивных зерен, проходящих через элементарную поверхность обрабатываемого рельса. Чем скорость больше, тем таких абразивных зерен будет меньше, а следовательно, шероховатость будет больше. Кроме того, следует отметить, что на всех диапазонах режимов шлифования, использованных при испытаниях, шероховатость формируемой поверхности не превышала установленных нормативной документацией значений по R_a – 6 мкм.

В испытаниях визуально производилась оценка наличия прижогов на отшлифованной поверхности. Проходы, после которых зафиксированы прижоги, отмечены знаком «+» в соответствующем столбце табл. 2. По отмеченным проходам можно установить, что возникновение

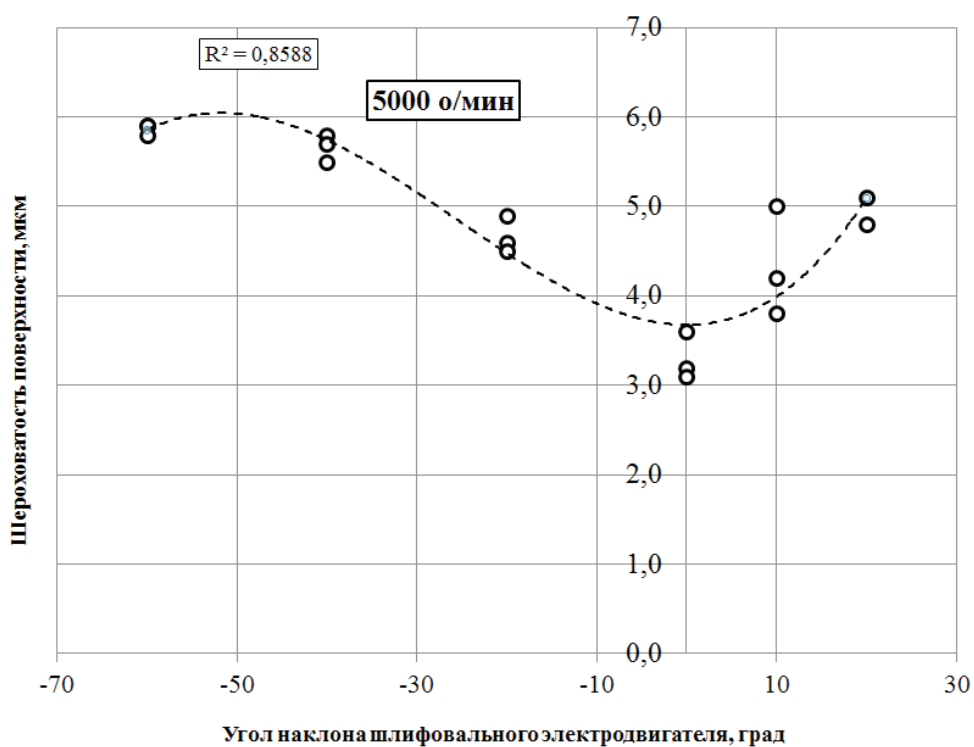


Рис. 14. Шероховатость поверхности по углам наклона шлифовального электродвигателя

Fig. 14. Surface roughness at the angles of inclination of grinding motor

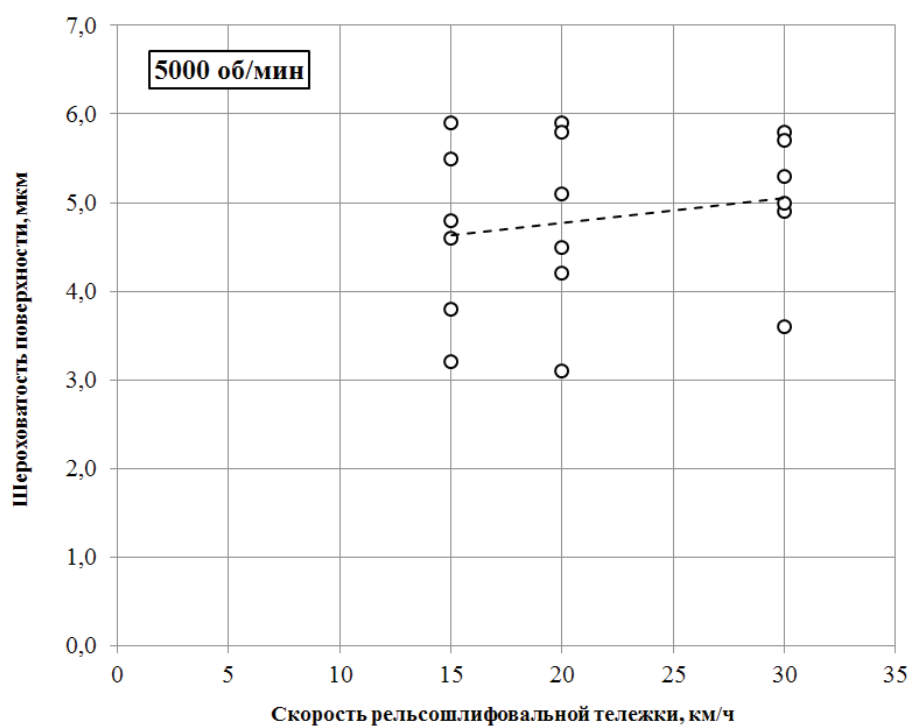


Рис. 15. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от режимов шлифования

Fig. 15. Dependence of roughness of the machined surface on grinding modes

прижогов происходит при превышении предельных нагрузок, возникающих во время шлифования. Это характерно при съемах металла, превышающих 0,35 мм.

Выводы

По результатам испытаний установлены следующие параметры рабочего оборудования проектируемого рельсошлифовального поезда, реализующего технологию скоростного шлифования рельсов.

1. Пневмосистема рельсошлифовального поезда должна реализовывать давление прижатия в диапазоне 0,8–1 атм на одну шлифовальную головку для обеспечения необходимого усилия прижатия шлифовального круга к рельсу 2800–2900 Н.

2. Диапазон токовых нагрузок при работе электропривода шлифовальной головки составляет от 37 до 53 А. С учетом долговременной работы электропривода параметры дизель-генераторной установки, системы охлаждения электродвигателей и электропроводка должны быть рассчитаны на максимальную токовую нагрузку с 1,5-кратным запасом, т. е. на 80 А.

3. При производстве и испытании абразивного инструмента для реализации технологии скоростного шлифования рельсов следует учитывать возможные динамические ударные нагрузки величиной до 3500 Н.

Экспериментально определенные параметры позволяют произвести соответствующий выбор комплектующих систем управления рельсошлифовального привода и рабочего оборудования.

Результаты исследований технологии скоростного шлифования рельсов позволяют сделать следующие выводы.

1. Проведенные испытания подтвердили выполнение требований технического задания на рельсошлифовальный поезд 2.0 по производительности. Средняя толщина снятия слоя металла рельса за один проход при максимальной мощности шлифования должна составлять:

- 0,3 мм при рабочей скорости РШП 10 км/ч;
- 0,2 мм при рабочей скорости РШП 15 км/ч.

2. Установлен возможный диапазон формируемой шероховатости обработанной поверхности рельсов в зависимости от режимов шлифования и угла наклона шлифовальной головки.

Возможные значения формируемой шероховатости по R_a – от 3,1 до 5,9 мкм, что соответствует требованиям нормативной документации по содержанию рельсов.

3. Определены допустимые значения режимов шлифования с учетом исключения возникновения прижогов на обработанной поверхности рельса. Наличие прижогов характерно для съема металла более 0,35 мм на скоростях движения шлифовальной тележки до 15 км/ч.

Список литературы

1. Fan W., Liu Y., Li J. Development status and prospect of rail grinding technology for high speed railway // Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 54, iss. 22. – P. 184–193. – DOI: 10.3901/JME.2018.22.184.
2. Schoch W. Grinding of rails on high-speed railway lines: a matter of great importance // Rail Engineering International. – 2007. – Vol. 36, iss. 1. – P. 6–8.
3. Funke H. Rail grinding. – Berlin: Transpress, 1986. – 153 p.
4. Cuervo P., Santa J., Toro A. Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad // Tribology International. – 2015. – Vol. 2. – P. 265–273. – DOI: 10.1016/j.triboint.2014.06.025.
5. Long term rail surface damage considering maintenance interventions / V. Krishna, S. Hossein-Nia, C. Casanueva, S. Stichel // Wear. – 2020. – Vol. 460–461. – P. 203462. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203462.
6. Application of grinding to reduce rail side wear in straight track / J. Ding, R. Lewis, A. Beagles, J. Wang // Wear. – 2018. – Vol. 402–403. – P. 71–79. – DOI: 10.1016/j.wear.2018.02.001.
7. Ilinykh A., Matafonov A., Yurkova E. Efficiency of the production process of grinding rails on the basis of optimizing the periodicity of works // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 1116. – P. 672–681. – DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_67.
8. Ильиных А.С. Скоростное шлифование рельсов в пути // Мир транспорта. – 2011. – № 3. – С. 56–61.
9. Повышение производительности рельсошлифовальных поездов методом скоростного шлифования / А.С. Ильиных, А.С. Пикалов, М.С. Галай, В.К. Милорадович // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (216). – С. 46–56. – DOI: 10.17213/15603644202244656.
10. Doman D., Warkentin A., Bauer R. A survey of recent grinding wheel topography models // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. –



Vol. 46, iss. 3. – P. 343–352. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013.

11. Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics / W. Zenga, Z. Lib, Z. Peib, C. Treadwell // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, iss. 12–13. – P. 1468–1473.

12. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine // *Journal of the Korean Society for Railway*. – 2020. – Vol. 23, iss. 7. – P. 688–695. – DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.

13. Koshin A.A., Chaplygin B.A., Isakov D.V. Adequacy of the operating conditions of abrasive grains // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, N 12. – P. 1221–1226.

14. Особенности формирования технологического процесса плоского шлифования торцом круга при упругой подвеске шлифовальной головки / А.С. Ильиных, В.А. Аксенов, М.С. Галай, А.В. Матафонов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 34–47. – DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.03.

15. A laboratory demonstration of rail grinding and analysis of running roughness and wear / M. Mesari-tis, M. Shamsa, P. Cuervo, J. Santa, A. Toro, M. Marshall, R. Lewis // *Wear*. – 2020. – Vol. 456–457. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203379.

16. Satoh Y., Iwafuchi K. Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan // *Wear*. – 2008. – Vol. 265, iss. 9–10. – P. 1342–1348. – DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.036.

17. Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone / K. Zhou, H. Ding, S. Zhang, J. Guo, Q. Liu, W. Wang // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 137. – P. 274–288. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.05.012.

18. Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds / K. Zhou, H. Ding, R. Wang, J. Yang, J. Guo, Q. Liu, W. Wang // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 143. – P. 106040. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106040.

19. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness / E. Uhlmann, P. Lypovka, L. Hochschild, N. Schröer // *Wear*. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 287–293. – DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.023.

20. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine // *Journal of the Korean Society for Railway*. – 2020. – Vol. 23, iss. 7. – P. 688 – 695. – DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.

21. Ilinykh A.S. Design of abrasive tool for high-rate grinding // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 53. – P. 012024. – DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012024.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Experimental studies of high-speed grinding rails modes

Andrey Ilinykh^{1, a, *}, Aleksandr Pikalov^{2, b}, Vladimir Miloradovich^{2, c}, Marina Galay^{1, d}

¹ Siberian Transport University, 191 Dusy Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

² Moscow Center for Infrastructure Technologies JSC "STM", 4B Podkopaevsky pereulok, 109028, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4234-6216>, asi@stu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9584-9896>, pikalov.2023@internet.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8258-5801>, vmiloradovich@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7897-1750>, galayms@mail.ru.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 May 2023

Revised: 29 May 2023

Accepted: 16 June 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Rail grinding
 Abrasive processing
 Grinding modes
 Railway track

Funding

The research was carried out with the financial support of subsidies from the Federal Budget for the development of cooperation between Russian educational institutions of higher education, state scientific institutions and organizations of the real sector of the economy in order to implement complex projects to create high-tech industries. The financial support is stipulated by the Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 No. 218 on the topic "High-performance technology for high-speed rail grinding and equipment for its implementation based on intelligent digital modules", agreement No. 075-11-2022-014 of April 08, 2022.

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Rails' grinding in the conditions of a railway track is a priority for extending its life cycle due to the timely removal of tread surface defects and formation of required transverse profile. Today, 14 RSHP-48 rail grinding trains are used in Russia. At the same time, most rail grinding trains are ending its service life. Therefore, the development of a fundamentally new rail grinding train with increased efficiency is an urgent task. Siberian transport university is working together with the Kaluga plant "Rempumash" to create a new rail grinding train named RSHP 2.0. The rail grinding train RSHP 2.0 is based on the technology of high-speed rail grinding, which is based on increasing working speed of rail grinding train by increasing rotational speed of grinding wheels and setting the angle of attack. **The aim of this work is** to study rails' grinding modes on a specially designed installation URSH, which implements the technology of high-speed grinding rails by increasing speed of grinding wheels rotation up to 5,000 rpm. **Research methods.** Grinding wheel speed control was carried out by IT-5-ChM "Termit" electronic tachometer and "Megeon 18005" laser tachometer. The angle of attack of grinding wheel was measured by digital, three-axis accelerometer-inclinometer ATst 90. The force of pressing grinding wheel to the rail was evaluated by strain-resistive sensors M50-0.5-C3. The measurement of head rail transverse profile before and after grinding and evaluation of metal removal were carried out by a PR-03 rail profiler. The width of grinding track was controlled by ShTsTs-I-300-0.01 caliper. The surface roughness of rail sample after machining was measured by TR 200 portable instrument. **Results and discussion.** Based on research results of CRS, the parameters of the working equipment of designed grinding rail train, which implements the technology of high-speed rail grinding, the influence of grinding modes on the formation of the quality parameters of the machined rail surface are established, and the optimal values of the forces of pressing the grinding wheel to the rail are determined.

For citation: Ilinykh A.S., Pikalov A.S., Miloradovich V.K., Galay M.S. Experimental studies of high-speed grinding rails modes. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 19–35. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-19-35. (In Russian).

* Corresponding author

Ilinykh Andrey S, D.Sc. (Engineering), Professor
 Siberian Transport University,
 191 Dusy Kovalchuk st.,
 630049, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (383) 328-03-92, e-mail: asi@stu.ru



References

1. Fan W., Liu Y., Li J. Development status and prospect of rail grinding technology for high speed railway. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 54, iss. 22, pp. 184–193. DOI: 10.3901/JME.2018.22.184.
2. Schoch W. Grinding of rails on high-speed railway lines: a matter of great importance. *Rail Engineering International*, 2007, vol. 36, iss. 1, pp. 6–8.
3. Funke H. *Rail grinding*. Berlin, Transpress, 1986. 153 p.
4. Cuervo P., Santa J., Toro A. Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad. *Tribology International*, 2015, vol. 2, pp. 265–273. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.06.025.
5. Krishna V., Hossein-Nia S., Casanueva C., Stichel S. Long term rail surface damage considering maintenance interventions. *Wear*, 2020, vol. 460–461, p. 203462. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203462.
6. Ding J., Lewis R., Beagles A., Wang J. Application of grinding to reduce rail side wear in straight track. *Wear*, 2018, vol. 402–403, p. 71–79. DOI: 10.1016/j.wear.2018.02.001.
7. Ilinykh A., Matafonov A., Yurkova E. Efficiency of the production process of grinding rails on the basis of optimizing the periodicity of works. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 1116, pp. 672–681. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_67.
8. Ilinykh A.S. Skorostnoe shlifovanie rel'sov v puti [Speed rail grinding]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*, 2011, no. 3, pp. 56–61.
9. Ilinykh A.S., Pikalov A.S., Galay M.S., Miloradovich V.K. Povyshenie proizvoditel'nosti rel'soshlifoval'nykh poezdov metodom skorostnogo shlifovaniya [Increasing the performance of rail grinding trains by the method of speed grinding]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2022, no. 4 (216), pp. 46–56. DOI: 10.17213/15603644202244656.
10. Doman D., Warkentin A., Bauer R. A survey of recent grinding wheel topography models. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, vol. 46, iss. 3, pp. 343–352. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013.
11. Zenga W., Lib Z., Peib Z., Treadwell C. Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, iss. 12–13, pp. 1468–1473.
12. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2020, vol. 23, iss. 7, pp. 688–695. DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.
13. Koshin A.A., Chaplygin B.A., Isakov D.V. Adequacy of the operating conditions of abrasive grains. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 12, pp. 1221–1226.
14. Aksenov V.A., Ilinykh A.S., Galay M.S., Matafonov A.V. Osobennosti formirovaniya tekhnologicheskogo protsessa ploskogo shlifovaniya tortsom kruga pri uprugoi podveske shlifoval'noi golovki [Features of formation of the flat grinding technological process by an end face of a circle with an elastic suspension grinding head]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 34–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.03.
15. Mesaritis M., Shamsa M., Cuervo P., Santa J., Toro A., Marshall M., Lewis R. A laboratory demonstration of rail grinding and analysis of running roughness and wear. *Wear*, 2020, vol. 456–457, pp. 287–293. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203379.
16. Satoh Y., Iwafuchi K. Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan. *Wear*, 2008, vol. 265, iss. 9–10, pp. 1342–1348. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.036.
17. Zhou K., Ding H., Zhang S., Guo J., Liu Q., Wang W. Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone. *Tribology International*, 2019, vol. 137, pp. 274–288. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.05.012.
18. Zhou K., Ding H., Wang R., Yang J., Guo J., Liu Q., Wang W. Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds. *Tribology International*, 2020, vol. 143, p. 106040. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106040.
19. Uhlmann E., Lypovka P., Hochschild L., Schröer N. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness. *Wear*, 2016, vol. 366–367, pp. 287–293. DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.023.
20. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2020, vol. 23, iss. 7, pp. 688–695. DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.
21. Ilinykh A.S. Design of abrasive tool for high-rate grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 53, p. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012024.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Концепция микромоделирования процесса соединения разнородных материалов пластической деформацией

Денис Салихьянов^{1, 2, а, *}, Николай Мичуров^{2, 3, в}

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

² Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³ Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, ул. Мира, 22, г. Екатеринбург, 620062, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-7235-7111>,  d.r.salikhianov@urfu.ru, ^в  <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>,  n.michurov@ya.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669

История статьи:

Поступила: 16 июня 2023

Рецензирование: 28 июня 2023

Принята к печати: 06 июля 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Слоистые композиты

Алюминиевые сплавы

Совместная деформация

Напряженно-деформированное состояние

Соединение материалов

Конечно-элементное моделирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20243 «Мульти-масштабное моделирование процессов соединения разнородных материалов пластической деформацией» при поддержке правительства Свердловской области.

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Прочность соединения разнородных материалов является наиболее важной характеристикой слоистых композитов, определяющей успех их освоения при промышленном производстве. С целью развития теории соединения материалов пластической деформацией в работе предложено выполнение компьютерного моделирования совместной деформации представленных объемов разнородных материалов в микромасштабе и сопоставление параметров напряженно-деформированного состояния с ранее представленным теоретическим механизмом. **Цель работы** заключается в анализе напряженно-деформированного состояния разнородных материалов при пластической деформации в микромасштабе и установлении месторасположения начала разрушения поверхностных оксидных пленок. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи работы: 1) исследование поверхностных профилей разнородных материалов, соединяемых пластической деформацией; 2) моделирование методом конечных элементов (КЭ) пластической деформации контактных поверхностей разнородных материалов в микромасштабе; 3) изучение стадий совместной деформации разнородных материалов в микромасштабе и верификация теоретической модели. **Методика исследований.** Исследование трехмерной топографии и шероховатости выполнено на Veeco Wyko NT1100 Optical Profiling System. В качестве основного инструмента для выполнения исследований выбран пакет КЭ-моделирования Deform-3D. В качестве исследуемых материалов выбраны алюминиевые сплавы АМг3 и Д16. **Результаты и обсуждение.** В работе выполнено компьютерное КЭ-моделирование совместной деформации поверхностей сплавов АМг3 и Д16 в микромасштабе, проведен анализ поверхностных профилей материалов после различных видов обработки, исследованы параметры напряженно-деформированного состояния и сопоставлены с параметрами теоретического механизма. По результатам сопоставления оценена адекватность предлагаемого теоретического механизма и отмечены практические трудности теоретического моделирования совместной деформации разнородных материалов в микромасштабе. КЭ-моделирование в микромасштабе позволило изучить протекание пластической деформации в приповерхностных слоях материалов, а также выявить области наиболее вероятного разрушения поверхностных оксидных пленок и, следовательно, области первичного соединения разнородных материалов.

Для цитирования: Салихьянов Д.Р., Мичуров Н.С. Концепция микромоделирования процесса соединения разнородных материалов пластической деформацией // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 36–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-36-49.

*Адрес для переписки

Салихьянов Денис Ринатович, к.т.н., доцент

Уральский федеральный университет,

ул. Мира, 28,

620002, г. Екатеринбург, Россия

Тел.: +7 (343) 375-44-37, e-mail: d.r.salikhianov@urfu.ru

Введение

Влияние шероховатости контактных поверхностей на соединение материалов при пластической деформации

Прочность соединения разнородных материалов является наиболее важной характеристикой слоистых композитов, определяющей успех их освоения при промышленном производстве [1]. Среди известных технологий производства слоистых металлических композитов (сварка взрывом, совместная прокатка, нанесение порошковых покрытий и др.) наиболее перспективными являются технологии на основе совместной прокатки благодаря высокой производительности процесса, возможности автоматизации и относительной простоты контроля качества. По сравнению с широко распространенной сваркой взрывом, полученные деформацией слоистые композиты обладают более высокой точностью, качеством и стабильностью свойств, а также меньшим уровнем вредных растягивающих остаточных напряжений.

Сдерживающим фактором развития производства слоистых композитов прокаткой и другими способами на основе обработки давлением является проблема получения прочного соединения их слоев [2]. На межслойной границе материалов при пластической деформации протекают сложные физико-химические процессы, поэтому определение режимов обработки давлением является трудоемкой задачей для каждого нового разрабатываемого композита. В результате разработка новых технологий неизбежно связана с большим объемом экспериментальной работы.

На настоящий момент проведено большое количество исследований, посвященных изучению влияния различных факторов совместной прокатки на прочность соединения материалов [3–8]. Джамаати и Торогинежад [3], а также Ли с соавторами [4] представили достаточно подробные обзорные работы, описывающие влияние этих факторов на прочность соединения одно- и разнородных металлов при совместной прокатке. В частности, Джамаати и Торогинежад [3] описали влияние обжатия, отжига до и после прокатки, исходной толщины листов, скорости прокатки, направления прокатки, коэффициента трения и наличия упрочняющих частиц. В ра-

боте Ли с соавторами [4] рассмотрено влияние условий прокатки, в частности обжатия, параметров очага деформации, наличия загрязнений и толщины оксидной пленки на соединяемых поверхностях, метода подготовки поверхности, условий трения и постотжига.

Обзорные [3, 4] и экспериментальные [9–17] работы показывают, что технология подготовки контактных поверхностей материалов относится к одному из наиболее значимых факторов, влияющих на процесс их соединения. Обработка поверхностей необходима для удаления частиц влаги, жира и загрязнений, а также для уменьшения толщин поверхностных оксидных пленок, препятствующих соединению материалов. Важно отметить, что в опубликованных работах до сих пор не приведены оптимальные параметры контактных поверхностей для соединения материалов, такие как средняя арифметическая шероховатость R_a , высота выступов H , средний шаг неровностей по вершинам S , длина волн выступов W и др.

Например, в [9] наивысшая прочность соединения стали и алюминия получена для поверхностей с шероховатостью $R_a = 5,8$ мкм среди возможных вариантов шероховатости соединяемых поверхностей 1,7, 1,8, 1,9, 3,6, 4,2 и 5,8. Худший результат получен для поверхностей с шероховатостью 1,8 мкм.

В [10] максимальная прочность соединения латуни и IF-стали получена при шероховатости контактных поверхностей 4,2 мкм среди шести вариантов шероховатости контактных поверхностей: 0,5, 1,7, 2,2, 2,9, 3,6 и 4,2 мкм. Худший результат наблюдается при шероховатости контактных поверхностей, равной 0,5 мкм.

В работах, указанных выше, сделан вывод о том, что чем больше шероховатость контактных поверхностей, тем выше достигаемая прочность соединения материалов. Далее представлены работы, в которых этот вывод не подтверждается.

В [11] лучшее качество соединения чистого алюминия и алюминиевого сплава AA2024 наблюдалось для соединяемых поверхностей с шероховатостью R_a менее 0,58 мкм из возможных вариантов 0,58, 0,13 и 0,03 мкм, полученных микроинжинирингом поверхностей, а также 0,05 и 0,25 мм, полученных макроинжинирингом. Худшее качество наблюдалось для поверхностей с шероховатостью $R_a = 0,25$ мм.

В [12] наивысшая прочность соединения чистого алюминия и сплава AA2024 достигнута при шероховатости контактных поверхностей 1 мкм среди следующих вариантов: полированная поверхность, $R_a = 1, 3$ и 5 мкм. Худший результат получен для полированной поверхности.

В [13] максимальная прочность соединения листов из технической чистой меди достигнута при шероховатости соединяемых поверхностной $R_z = 0,09$ мкм среди вариантов R_z , равных 0,09, 1,5, 4,4 и 14 мкм. В работе говорится, что чем больше отношение высоты H к ширине основания W выступов профилей соединяемых поверхностей металлов, тем больше прочность соединения. Стоит отдельно отметить, что только в указанной работе были представлены результаты измерения отношения H/W .

В [14] наивысшая прочность соединения листов из нержавеющей мартенситной стали 1Cr11Ni2W2MoV получена при шероховатости контактных поверхностей $R_a = 0,43$ мкм среди двух вариантов: 0,43 и 0,95 мкм.

Как видно из двух последних работ, для определенных условий совместной пластической деформации уменьшение шероховатости контактных поверхностей способствует соединению материалов.

Механизм контактного взаимодействия между разнородными материалами при пластической деформации

С целью развития теории соединения материалов пластической деформацией и создания новых фундаментальных моделей в предыдущей работе автора [18] была представлена разработанная теоретическая модель совместной пластической деформации разнородных материалов. В модели предполагался контакт двух материалов, один из которых более твердый по отношению к другому. До определенного предела интенсивности напряжений на контакте между материалами более твердый материал допустимо считать недеформируемым. Модель была разработана в плоской постановке, анализ напряжений проводился методом линий скольжения с соответствующими методу допущениями. В модели учитывался поверхностный профиль только твердого материала, так как мягкий материал на первых стадиях активно деформируется и принимает форму более твердого материала.

Косвенно это предположение подтверждается в исследовании [10], в котором сделан вывод о большем влиянии шероховатости поверхности твердого материала в сравнении с мягким.

Схематично модель соединения изображена на рис. 1 в виде последовательных стадий развития деформации в приконтактных слоях материалов:

I стадия – внедрение выступов более твердого материала в мягкий материал. Мягкий материал выдавливается из-под выступов более твердого материала и течет в полости поверхностного профиля твердого материала. Очаги деформации друг с другом не контактируют;

II стадия – заполнение полостей на поверхности твердого материала мягким материалом. Очаги деформации в контакте, в центре образуется общий очаг деформации, заполняемый из-под соседних выступов;

III стадия – критическая стадия заполнения полостей поверхности твердого материала мягким материалом, течение которого затруднено влиянием соседствующих выступов. Незаполненная часть полости представляет собой остаточную пору на межслойной границе;

IV стадия – распространение пластической деформации в глубинные слои мягкого металла за счет подпора, создаваемого на контакте с твердым материалом.

Дальнейшее заполнение полостей твердого материала, а также его пластическая деформация возможны только после наклепа основного объема мягкого материала. С точки зрения образования соединения важным является момент и место разрушения поверхностных оксидных пленок. По результатам теоретического анализа, выполненного в [18, 19], были выявлены участки наиболее вероятного разрушения поверхностных оксидных слоев:

- участки мягкого металла под выступами, характеризующиеся большими значениями накопленной пластической деформации Λ и низкими значениями относительного среднего нормального напряжения σ/T , что означает превалирующую долю сжимающих напряжений (Λ – степень деформации сдвига; σ – среднее напряжение; T – интенсивность касательных напряжений);

- участки мягкого металла в центре свободной поверхности, характеризующиеся низкими

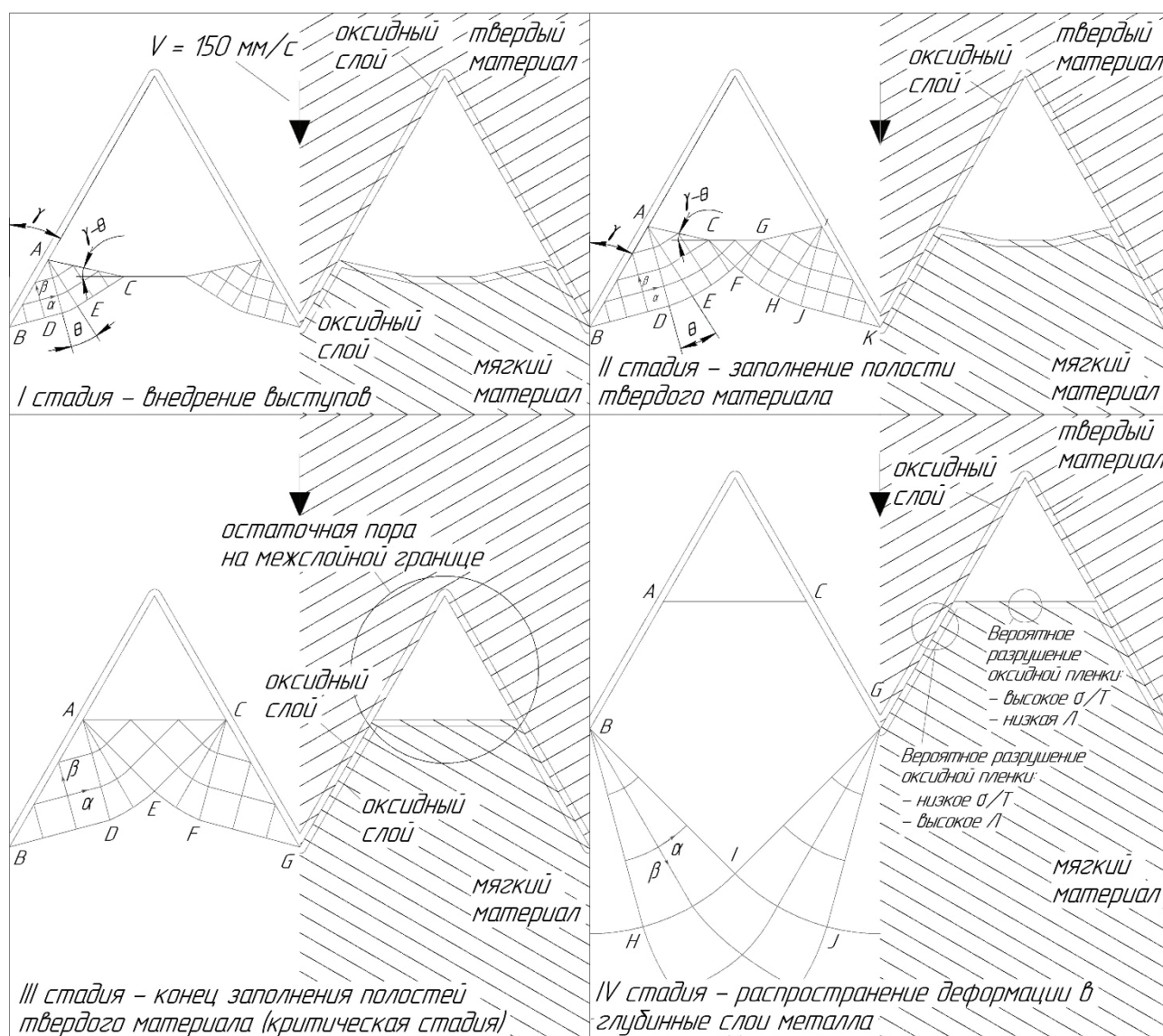


Рис. 1. Теоретическая модель пластической деформации разнородных материалов в микромасштабе

Fig. 1. Microscale theoretical model of plastic deformation of dissimilar materials

значениями накопленной пластической деформации Λ и высокими значениями показателя на напряженном состоянии σ/T , соответствующими повышенной доле растягивающих напряжений.

В зависимости от профиля поверхности твердого материала, выраженного отношением высоты к ширине основания выступов H/W , значения напряженно-деформированного состояния и объем незаполнения полости варьируются в широком диапазоне [18].

Вследствие указанных ограничений теоретической модели установить расположение места разрушения оксидных пленок и последующей инициации образования мостиков связи между чистыми металлами не представляется возможным. Кроме того, не известно, насколько разра-

ботанная теоретическая модель отражает реальное контактное взаимодействие поверхностей разнородных материалов при пластической деформации.

В связи с этим в настоящей работе поставлена **цель**: анализ напряженно-деформированного состояния разнородных материалов при пластической деформации в микромасштабе и установление месторасположения начала разрушения поверхностных оксидных пленок. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи** работы: 1) исследование поверхностных профилей разнородных материалов, соединяемых пластической деформацией; 2) моделирование методом конечных элементов (КЭ) пластической деформации контакт-

ных поверхностей разнородных материалов в микромасштабе; 3) изучение стадий совместной деформации разнородных материалов в микромасштабе и верификация теоретической модели.

Методика исследований

Объектом исследования являлся процесс совместной деформации алюминиевых сплавов Д16 (сплав серии 2xxx, термически и деформационно упрочняемый) и АМг3 (сплав серии 5xxx, деформационно упрочняемый) [20].

Соединяемые поверхности алюминиевых сплавов перед пластической деформацией подвергались обезжириванию ацетоном, сушке и поверхностной обработке. Механическая обработка поверхности сплавов проводилась по двум крайним вариантам: а) ленточное шлифование лентой с зернистостью Р40 (средняя зернистость); б) ленточное шлифование лентой с зернистостью Р120 (мелкая зернистость). Шлифование выполнялось со скоростью движения ленты 250 м/мин, направление шлифования совпадало с направлением прокатки.

Исследование трехмерной топографии и шероховатости выполнено на Veeco Wyko NT1100 Optical Profiling System. В результате исследования получен массив координатных точек поверхности площадью 1159×756 мкм и параметры шероховатости: средняя шероховатость R_a , среднеквадратичная шероховатость R_q , общая высота профиля шероховатости R_t . Полученный массив координатных точек был использован для создания трехмерной поверхности и трехмерных твердотельных моделей представительных объемов приповерхностных слоев материалов с размерами 1159×756×600 (Д×Ш×В) для КЭ-моделирования в микромасштабе.

Сплавы Д16 и АМг3 поставлялись в отожженном (мягком) состоянии. Кривые упрочнения сплавов были построены с использованием кулачкового пластометра ИМАШ УрО РАН, а затем интегрированы в среду Deform-3D. Получившееся соотношение со-

противлений деформаций сплавов $\frac{\sigma_{Д16}}{\sigma_{АМг3}}$ близко к 0,8.

В качестве основного инструмента для выполнения исследований выбран пакет КЭ-моделирования Deform-3D. С целью экономии вычислительных ресурсов при решении задач были использованы окна плотности с размером КЭ внутри окон 22–23 мкм, снаружи 50 мкм. Перед пластической деформацией представительные объемы материалов сводились к контакту, как показано на рис. 2, с заданными граничными условиями. С целью предотвращения смещения одного представительного объема относительно другого, а также предотвращения потери устойчивости на одной из граней задавалось граничное условие $v_y = 0$ мкм/с. На верхней грани,

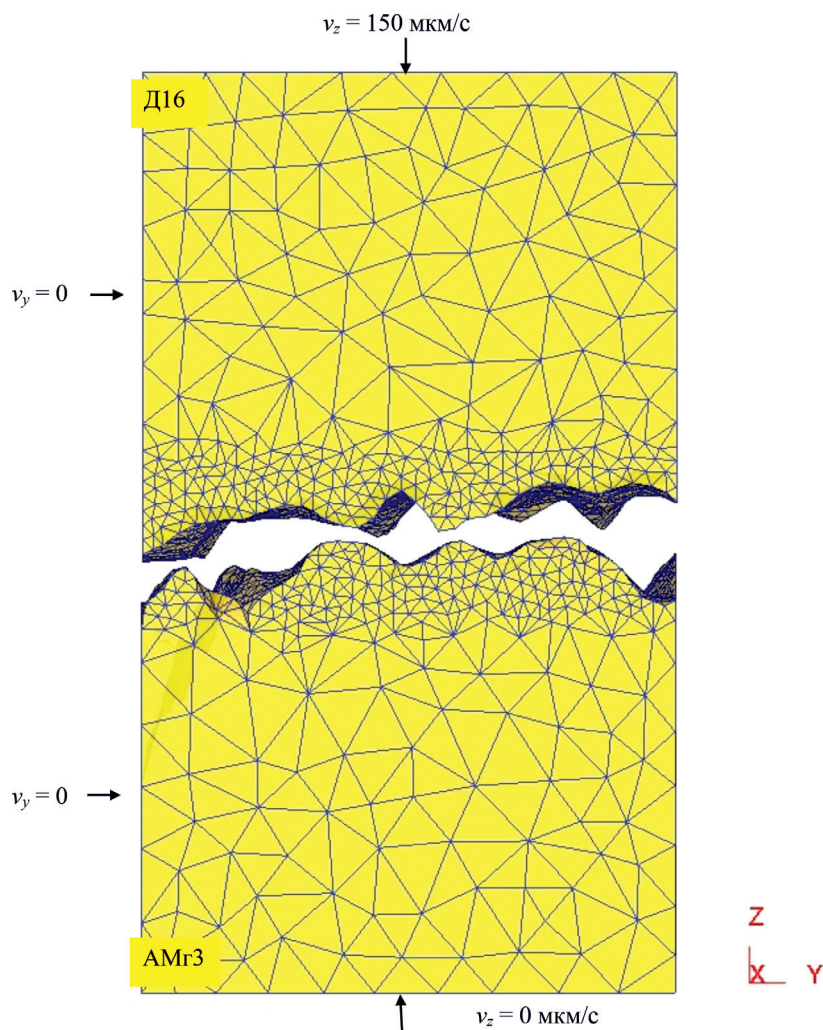


Рис. 2. Постановка задачи моделирования процесса пластической деформации сплавов АМг3 и Д16 в микромасштабе

Fig. 2. Problem statement of microscale simulation of the process of plastic deformation of alloys AMg3 and D16

противоположной поверхности выступов представительного объема материала АМгЗ, приложена скорость перемещения $v_z = 150$ мкм/с. Под воздействием создаваемого усилия в определенный момент в обоих материалах возникала пластическая деформация. Процесс пластической деформации продолжался до момента достижения максимального значения сопротивления деформации сплава Д16.

Результаты и их обсуждение

Исследование поверхностных профилей

На первом этапе исследования получены твердотельные модели представительных объемов сплавов АМгЗ и Д16 после обработки шлифмашиной со шлифовальной лентой зернистости Р40 и Р120. Пример модели для сплава АМгЗ после обработки лентой зернистости Р40 представлен на рис. 3. Благодаря выбранному виду поверхностной обработки на всех материалах получен продольный профиль, как показано на рис. 3. В связи с этим моделируемые процессы допустимо рассматривать в контексте сравнения с теоретической моделью в плоской постановке.

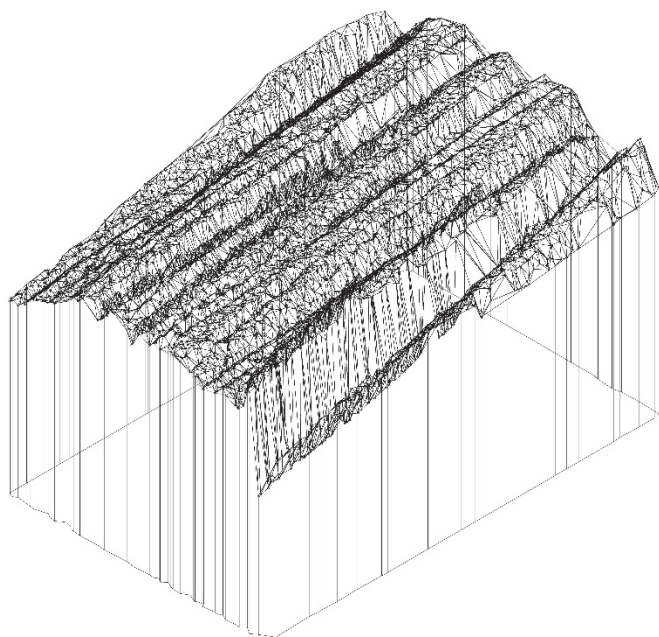


Рис. 3. Представительный объем сплава АМгЗ с поверхностной обработкой шлифмашиной с лентой зернистости Р40

Fig. 3. Representative volume of AMg3 alloy with surface machined by a grinder with a P40 grit band

Созданные твердотельные модели были подвергнуты анализу в отдельных сечениях через шаг 100 мкм с целью установления средних значений фактического отношения высоты к ширине основания выступов H/W или фактического значения $\frac{1}{2}\text{ctg}(\alpha)$, где α – угол вершины выступа. Пример анализа сечений представительных объемов материалов после разных видов поверхностной обработки показан на рис. 4. Как видно из рис. 4, поверхностный профиль материалов после обработки представляет собой набор хаотически расположенных фигур разной формы и размеров. Исходя из визуального наблюдения наиболее подходящими геометрическими фигурами для описания сечения поверхностных профилей являются треугольники и трапеции.

Результаты оценки параметров поверхностных профилей α и H/W сведены в табл. 1. Видно, что один и тот же вид поверхностной обработки создает разные поверхностные профили в зависимости от материала, что связано в первую очередь с прочностными характеристиками и твердостью обрабатываемых материалов. Чем мягче материал (в нашем случае отожженный Д16), тем параметры шероховатости R_a и R_t ниже.

Шлифование лентами с разной зернистостью оказало неодинаковое влияние на исследуемые материалы: уменьшение зернистости ленты с Р40 до Р120 привело к уменьшению параметров шероховатости R_a и R_t и уменьшению среднего угла вершины выступов сплава АМгЗ, в то время как у сплава Д16 отмечено небольшое увеличение параметров шероховатости R_a и R_t и уменьшение среднего угла вершины выступа. Полученные средние углы вершин выступов для всех материалов лежат в диапазоне 40–60°, а отношение высоты выступа к ширине основания H/W – в диапазоне 0,29–0,6.

Согласно теоретической модели [18] для полученной геометрии выступов относительная глубина внедрения h_l/H должна лежать в диапазоне 0,56–0,64 к моменту начала распространения пластической деформации в объеме мягкого материала, где h_l – глубина внедрения выступов твердого материала в мягкий материал. Приведенное нормальное напряжение на контакте материалов σ/k должно лежать в диапазоне от –2,4 до –3,09, где k – сопротивление деформации мягкого материала на сдвиг.

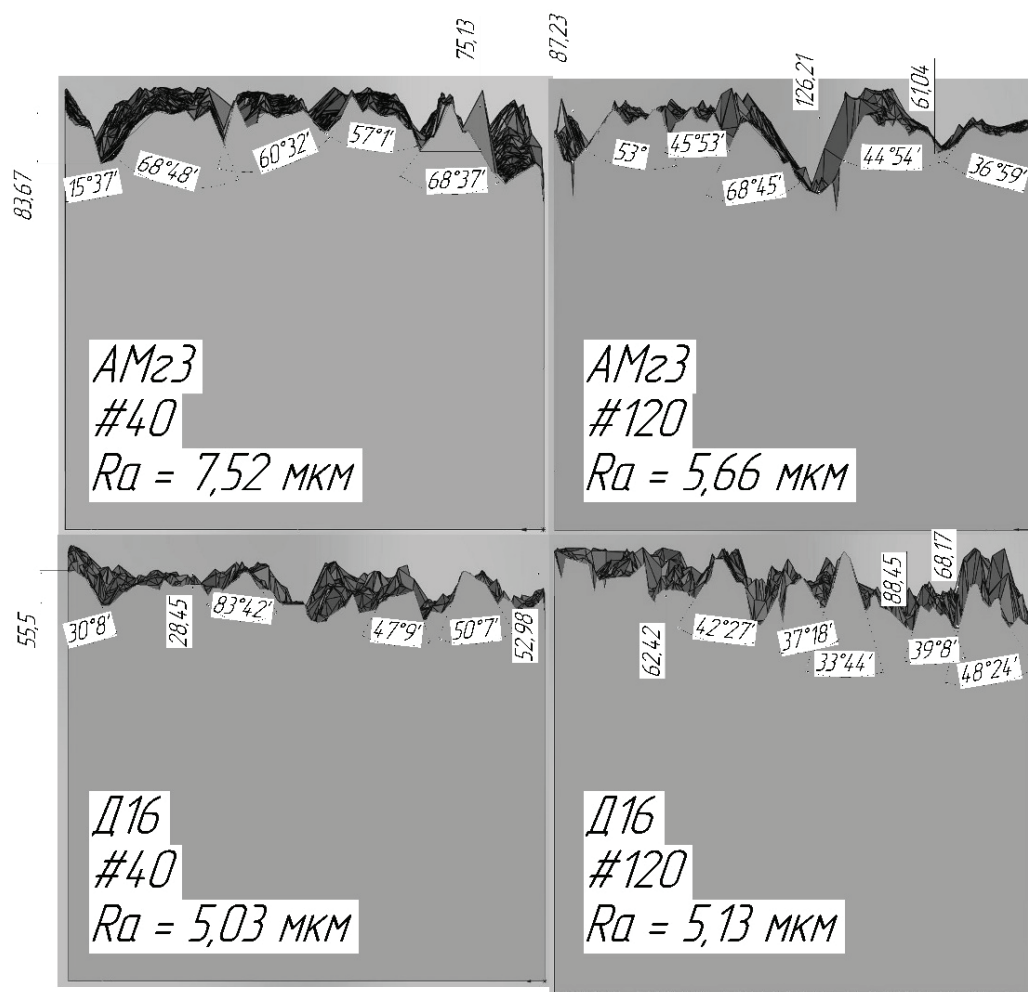


Рис. 4. Сечения представительных объемов сплавов АМг3 и Д16 после обработки на шлифмашине с лентами зернистости Р40 и Р120

Fig. 4. Cross-sections of representative volumes of AMg3 and D16 alloys after grinding with 40 and 120 grit bands

Таблица 1

Table 1

Параметры топографии поверхностей сплавов АМг3 и Д16 после обработки на шлифмашине с лентами зернистости Р40 и Р120

Surface topography parameters of AMg3 and D16 alloys after grinding with 40 and 120 grit bands

Материал / вид обработки / Material / type of grinding	Средняя шероховатость R_a , мкм / Average roughness R_a , μm	Общая высота профиля шероховатости R_p , мкм / Total height of profile R_p , μm	Средний угол вершины выступа / Average angle of the top of peaks	Отношение высоты выступа к ширине основания H/W / The ratio of the height of peak to the width of peak base
АМг3/Р40 AMg3/40 grit	7,52	126,19	57°	0,33
АМг3/Р120 AMg3/120 grit	5,66	116,19	49°	0,43
Д16/Р40 D16/40 grit	5,03	46,24	60°	0,29
Д16/Р120 D16/120 grit	5,13	55,15	40°	0,6

Исследование пластической деформации разнородных материалов в микромасштабе

Как было указано в методике исследования, поверхностные профили материалов АМг3 и Д16 были сведены до контакта, после чего была инициирована пластическая деформация. На рис. 5 показан первоначальный момент контакта поверхностей материалов после обработки лентами с зернистостью Р40 и Р120 в некотором центральном сечении представительных объемов. Как видно, реальная картина контакта между материалами в случайной плоскости не повторяет в чистом виде идеализированную теоретическую модель: периодически повторяющиеся выступы имеют разную форму и размеры; напротив выступов одного материала могут располагаться как выступы, так и впадины другого материала. Соответственно в процессе пластической деформации стадии, описанные в разделе «Механизм контактного взаимодействия между разнородными материалами при пластической деформации», будут происходить неодновременно по всей площади контакта.

Для того чтобы оценить стадии совместной пластической деформации разнородных материалов, шкала интенсивности деформации

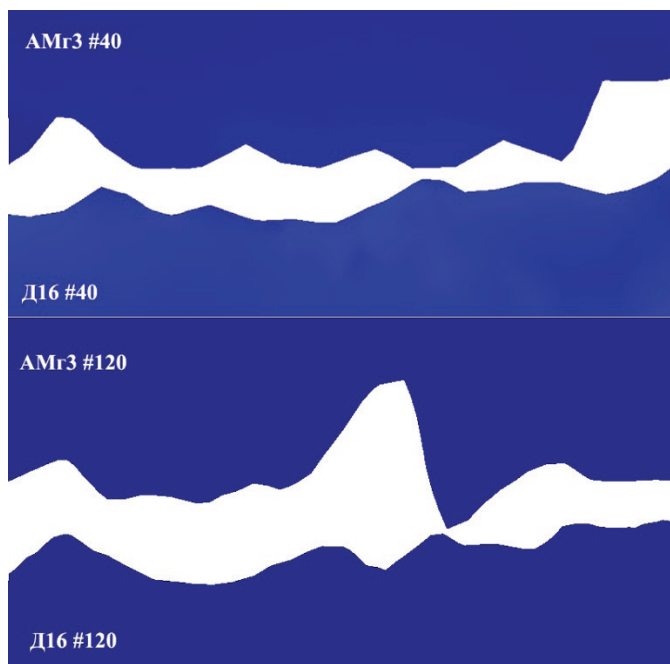


Рис. 5. Контакт поверхностей сплавов АМг3 и Д16 до пластической деформации в случайном сечении

Fig. 5. Contact of surfaces of AMg3 and D16 alloys before plastic deformation in a random cross-section

была настроена с верхним пороговым уровнем 120 МПа, что эквивалентно пределу текучести сплава АМг3. При достижении узловых точек КЭ 120 МПа соответствующие области материалов подсвечивались красным цветом, что означало переход материала в пластическое состояние. При достижении всего объема обоих материалов уровня 120 МПа шкала перенастраивалась на следующий верхний уровень – 200 МПа, что соответствовало максимальному значению сопротивления деформации сплава Д16. Ключевые стадии совместной пластической деформации материалов, обработанных лентой Р40, показаны на рис. 6, лентой Р120 – на рис. 7.

Как видно из рис. 6 и 7, течение материалов на I стадии совместной деформации довольно сильно отличается от идеализированного представления: при контакте практически одновременно начинается пластическая деформация как сплава Д16, так и более прочного сплава АМг3. Анализ деформации представительных объемов показывает, что в основном происходит одновременное смятие выступов обоих материалов. Это связано в первую очередь с близостью со-

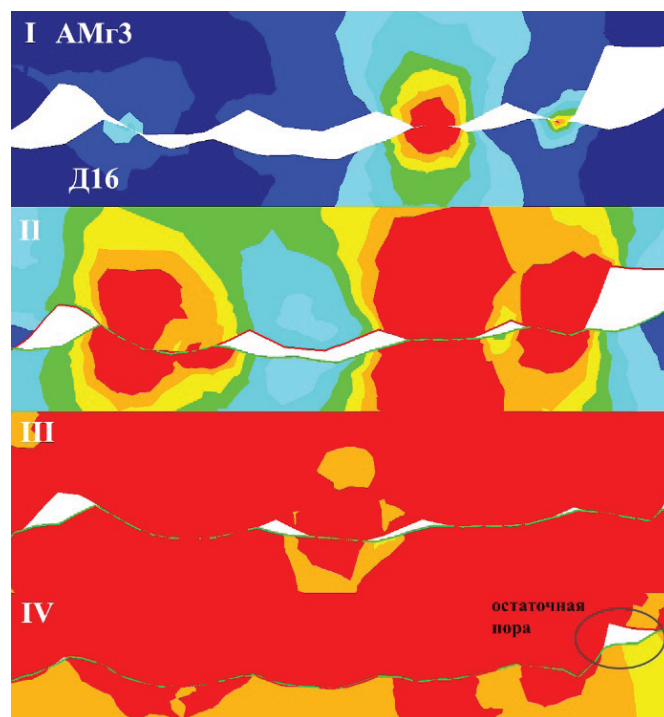


Рис. 6. Стадии совместной пластической деформации сплавов АМг3 и Д16, предварительно обработанных лентой с зернистостью Р40

Fig. 6. Stages of joint plastic deformation of AMg3 and D16 alloys preliminary grinded with a 40 grit band

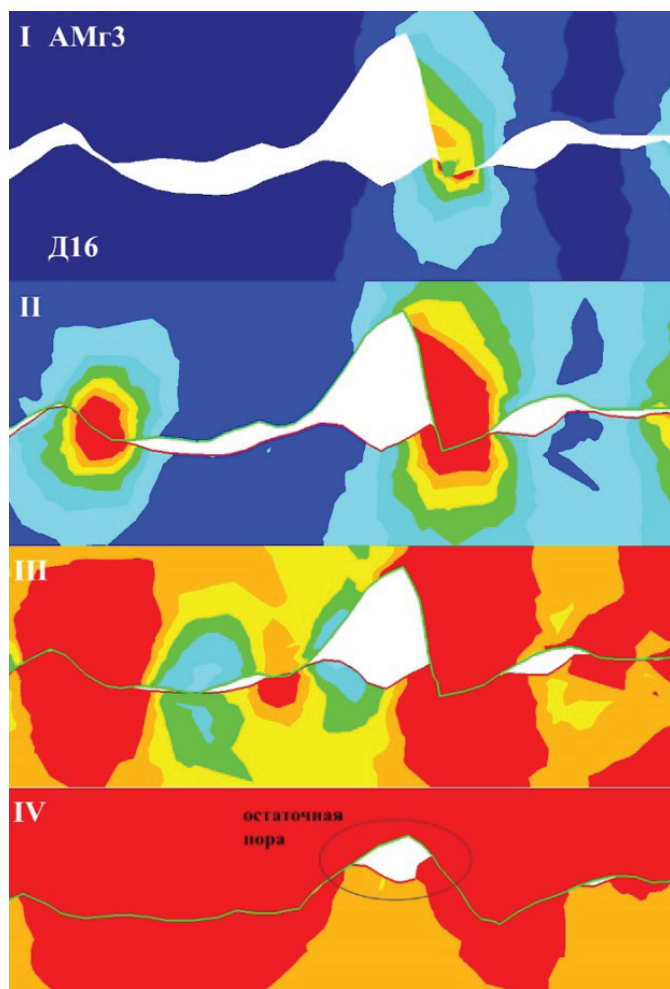


Рис. 7. Стадии совместной пластической деформации сплавов АМг3 и Д16, предварительно обработанных лентой зернистости Р120

Fig. 7. Stages of joint plastic deformation of AMg3 and D16 alloys preliminary grinded with a 120 grit band

противлений деформаций сплавов, отношение которых близко к 0,8. К концу критической стадии II на границе между материалами остаются незаполненные участки полостей вследствие недостаточности приложенных давлений, при этом пластическая деформация начинает распространяться вглубь объемов обоих материалов (стадия III).

По мере увеличения наклепа обоих материалов и роста давлений на межслойной границе происходит дозаполнение полостей на поверхности сплава АМг3. При достижении максимального значения интенсивности напряжений для сплава Д16 на межслойной границе остаются незаполненные полости – остаточные поры, для заполнения которых требуется дальнейшее увеличение давлений. Таким образом, несмотря

на отличия на первом этапе совместной пластической деформации, конечные стадии протекают в соответствии с предлагаемым теоретическим механизмом.

На стадии III микромоделей совместной пластической деформации были оценены и сопоставлены с теоретической моделью [18], при этом оценивались следующие параметры: относительная глубина внедрения h_i/H и приведенное нормальное напряжение на контакте материалов σ/k (табл. 2). Как видно из табл. 2, относительная глубина внедрения выступов h_i/H КЭ микромоделей значительно отличается от результатов расчета по теоретической модели. Расхождение объясняется прежде всего значительными отличиями фактических профилей поверхностей материалов от теоретических, а также близостью сопротивлений деформаций материалов, из-за чего они деформируются практически одновременно.

Расхождения в приведенных нормальных напряжениях σ/k , полученные путем анализа КЭ микромоделей и теоретической модели, также заметны, что объясняется близостью сопротивлений деформаций слоев материалов и практически одновременным переходом их в пластическое состояние. В результате для заданного процесса теоретическая модель [12] дает лишь приближенные значения показателей напряженно-деформированного состояния.

Отдельным важным практическим вопросом КЭ-микромоделирования являлось установление участков наиболее вероятного разрушения поверхностных оксидных слоев. В качестве критерия для оценки вероятности разрушения был использован хорошо известный критерий

Кокрофта – Лэтема $\int_0^{\bar{\epsilon}_p} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}$, где σ_1 – главное

напряжение; $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений; $d\bar{\epsilon}$ – приращение накопленной пластической деформации. На рис. 8 показана поверхность контакта на стороне сплава Д16 в начале III стадии совместной пластической деформации с подсвеченными точками контакта с поверхностью АМг3 и без точек контакта. Рис. 8 демонстрирует, что наиболее высокие значения поврежденности поверхностных слоев наблюдаются на участках, свободных от контакта с противо-

Результаты сопоставления параметров напряженно-деформированного состояния КЭ микромоделей с теоретическим механизмом [18]

The results of comparing the parameters of the stress-strain state of the *FE* micromodel with the theoretical mechanism [18]

Материалы / вид обработки / Materials / type of grinding	Относительная глубина внедрения h_l/H / Relative penetration depth h_l/H		Приведенное нормальное напряжение σ/k / Reduced normal stress σ/k	
	Теоретическая модель [18] / Theoretical model [18]	КЭ микромодель / <i>FE</i> micromodel	Теоретическая модель [18] / Theoretical model [18]	КЭ микромодель / <i>FE</i> micromodel
АМг3-Д16/Р40 / <i>AMg3-D16/40</i> grit	0,62	0,86	-2,92	-2,45
АМг3-Д16/Р120 / <i>AMg3-D16/120</i> grit	0,61	0,4	-2,75	-1,9

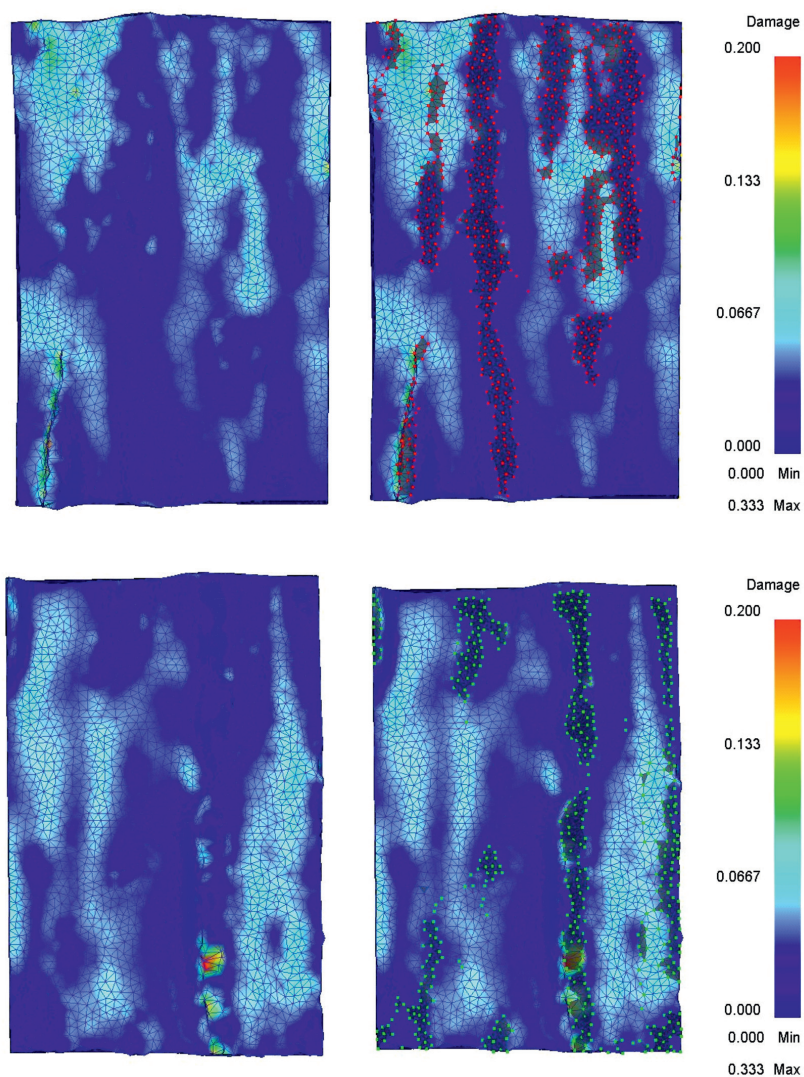


Рис. 8. Зоны наиболее вероятного разрушения поверхностных оксидных слоев сплава Д16

Fig. 8. Areas of the most probable fracture of the surface oxide layers on the D16 alloy

ложным материалом. Отсюда следует вывод, что более значимым фактором разрушения поверхностных оксидных пленок являются высокие значения показателя напряженного состояния σ/T , характерные для поверхностей, свободных от контакта с противоположным материалом.

Закключение

В работе выполнено компьютерное КЭ-моделирование совместной деформации поверхностей сплавов АМгЗ и Д16 в микромасштабе, проведен анализ поверхностных профилей материалов после различных видов обработки, исследованы параметры напряженно-деформированного состояния и сопоставлены с параметрами теоретического механизма.

Сопоставление параметров напряженно-деформированного состояния, полученных при КЭ-моделировании в микромасштабе, с параметрами теоретической модели показало заметные расхождения на I и II стадиях совместной деформации, что связано с близкими значениями сопротивлений деформации соединяемых материалов и отклонением фактического поверхностного профиля от идеализированного. Несмотря на это, после наступления критической стадии III дальнейшая совместная деформация протекает в соответствии с предлагаемым теоретическим механизмом: на границе между материалами остаются незаполненные участки полостей, а пластическая деформация начинает распространяться вглубь объемов обоих материалов. По мере увеличения наклепа обоих материалов и роста давлений на межслойной границе происходит дозаполнение полостей на поверхности сплава.

Таким образом, КЭ-моделирование совместной деформации в микромасштабе позволило выявить границы применения теоретического механизма, расхождения в случае совместной деформации материалов с близкими значениями сопротивления деформации, а также направления дальнейшего совершенствования. Теоретическую модель рекомендуется использовать для анализа процессов совместной деформации материалов с большей разницей в сопротивлениях деформации. При изучении процессов деформации материалов с близкими значениями сопротивления деформации представленная модель

адекватно отражает последовательность после наступления критической стадии, а именно в момент начала распространения пластической деформации вглубь объемов материалов. Для расширения границ использования теоретической модели рекомендуется рассмотреть задачу пластического смятия выступов.

Список литературы

1. Joining by forming—A review on joint mechanisms, applications and future trends / P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst, F. Resch // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214. – P. 1972–1994. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.022.
2. Joining by plastic deformation / K.-I. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, A.E. Tekkaya // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 62. – P. 673–694. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.004.
3. Jamaati R., Toroghinejad M.R. Cold roll bonding bond strengths: review // *Materials Science and Technology*. – 2011. – Vol. 27, iss. 7. – P. 1101–1108. – DOI: 10.1179/026708310X12815992418256.
4. Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2008. – Vol. 9. – P. 023001. – DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
5. Rezayat M., Akbarzadeh A. Bonding behavior of Al–Al₂O₃ laminations during roll bonding process // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 36. – P. 874–879. – DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.048.
6. Tang C., Liu Z., Zhou D. Surface treatment with the cold roll bonding process for an aluminum alloy and mild steel // *Strength of Materials*. – 2015. – Vol. 47, iss. 1. – P. 150–155. – DOI: 10.1007/s11223-015-9641-3.
7. Arbo S.M., Westermann I., Holmedal B. Influence of stacking sequence and intermediate layer thickness in AA6082-IF steel tri-layered cold roll bonded composite sheets // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 767. – P. 316–322. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.767.316.
8. The effect of surface preparation on the bond strength of Al-St strips in CRB process / C. Gao, L. Li, X. Chen, D. Zhou, C. Tang // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 107. – P. 205–211. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.112.
9. Study of different surface pre-treatment methods on bonding strength of multilayer aluminum alloys/steel clad material / M. Akdesir, D. Zhou, F. Foadian, H. Palkowski // *International Journal of Engineering Research & Science*. – 2016. – Vol. 2, iss. 1. – P. 169–177.
10. Bagheri A., Toroghinejad M.R., Taherizadeh A. Effect of roughness and surface hardening on the



mechanical properties of three-layered brass/IF steel/brass composite // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2018. – Vol. 71, iss. 9. – P. 2199–2210. – DOI: 10.1007/s12666-018-1351-7.

11. Macro- and micro-surface engineering to improve hot roll bonding of aluminum plate and sheet / J. Liu, M. Li, S. Sheu, M.E. Karabin, R.W. Schultz // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 479. – P. 45–57. – DOI: 10.1016/j.msea.2007.06.022.

12. Development of a testing procedure to determine the bond strength in joining-by-forming processes / A. Mikloweit, M. Bambach, M. Pietryga, G. Hirt // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 966–967. – P. 481–488. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.481.

13. Wang A., Ohashi O., Ueno K. Effect of surface asperity on diffusion bonding // Materials Transactions. – 2006. – Vol. 47, iss. 1. – P. 179–184. – DOI: 10.2320/matertrans.47.179.

14. Zhang Ch., Li H., Li M. Role of surface finish on interface grain boundary migration in vacuum diffusion bonding // Vacuum. – 2017. – Vol. 137. – P. 49–55. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.12.021.

15. Effect of the steel sheet surface hardening state on interfacial bonding strength of embedded aluminum–steel composite sheet produced by cold roll bonding

process / Ch. Wang, Y. Jiang, J. Xie, D. Zhou, X. Zhang // Materials Science & Engineering A. – 2016. – Vol. 652. – P. 51–58. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.039.

16. Danesh Manesh H., Shahabi H.Sh. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 476, iss. 1–2. – P. 292–299. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.08.081.

17. Jamaati R., Toroghinejad M.R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2011. – Vol. 20, iss. 2. – P. 191–197. – DOI: 10.1007/s11665-010-9664-7.

18. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation // Comptes Rendus Mecanique. – 2019. – Vol. 347. – P. 588–600. – DOI: 10.1016/j.crme.2019.07.002.

19. Bogatov A., Salikhyanov D. Development of bonding mechanisms for different materials during forming // Metallurgist. – 2017. – Vol. 60, iss. 11–12. – P. 1175–1179. – DOI: 10.1007/s11015-017-0424-x.

20. Буркин С.П., Бабайлов Н.А., Овсянников Б.В. Сопротивление деформации сплавов Al и Mg: справочное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 344 с. – ISBN 978-5-321-01755-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



The concept of microsimulation of processes of joining dissimilar materials by plastic deformation

Denis Salikhyanov^{1, 2, a, *}, Nikolay Michurov^{2, 3, b}

¹ Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya Str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

³ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 22 Mira Str., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7235-7111>, d.r.salikhianov@urfu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>, n.michurov@ya.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 June 2023

Revised: 28 June 2023

Accepted: 06 July 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Laminated composites

Aluminum alloys

Joint deformation

Stress-strain state

Materials bonding

Finite element simulation

Funding

This study was performed in the frame of the grant № 22-29-20243 “Multi-scale simulation of processes of joining dissimilar materials by plastic deformation” funded by the Russian Science Foundation with the support of the government of Sverdlovsk region.

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Bond strength between dissimilar materials is the most important characteristic of laminated composites, which determines the success of its development for industrial use. In order to develop the theory of joining materials by plastic deformation, it is proposed to perform computer simulation of joint deformation of representative volumes of dissimilar materials on a microscale and compare the parameters of the stress-strain state with the previously presented theoretical mechanism. **The aim of this work** is to analyze the stress-strain state of dissimilar materials under plastic deformation on a microscale and to establish the location of the onset of fracture of surface oxide films. To achieve this aim, **the following tasks** of the work are formulated: 1) to study the surface profiles of dissimilar materials to be bonded by plastic deformation; 2) to simulate by the finite element method (FE) the plastic deformation of contact surfaces of dissimilar materials on a microscale; 3) to study the stages of joint deformation of dissimilar materials on a microscale and verify of the theoretical mechanism. **Research methodology.** The study of three-dimensional topography and roughness was carried out on a Veeco Wyko NT1100 Optical Profiling System. Deform-3D FE simulation package was chosen as the main research tool. Aluminum alloys AMg3 and D16 were chosen as the materials under study. **Results and discussion.** In this work, computer FE simulating of the joint deformation of the surface layers of AMg3 and D16 alloys on a microscale was performed, an analysis of the surface profiles of materials after various types of processing was carried out, the parameters of the stress-strain state were studied and compared with the parameters of the theoretical mechanism. Based on the results of the comparison, the adequacy of the proposed theoretical mechanism was assessed, and the practical difficulties of theoretical simulation of the joint deformation of dissimilar materials on the microscale were noted. Microscale FE simulation made it possible to study the flow of plastic deformation in the near-surface layers of materials, as well as to identify areas of the most probable fracture of surface oxide films and, consequently, areas of primary bonding of dissimilar materials.

For citation: Salikhyanov D.R., Michurov N.S. The concept of microsimulation of processes of joining dissimilar materials by plastic deformation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 36–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-36-49. (In Russian).

* Corresponding author

Salikhyanov Denis R., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
28 Mira Str., Ekaterinburg,
620002, Russian Federation
Tel.: +7 (343) 375-44-37, e-mail: d.r.salikhianov@urfu.ru

References

1. Groche P., Wohletz S., Brenneis M., Pabst C., Resch F. Joining by forming – A review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, pp. 1972–1994. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.022.
2. Mori K.-I., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. Joining by plastic deformation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2013, vol. 62, pp. 673–694. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.004.
3. Jamaati R., Toroghinejad M.R. Cold roll bonding bond strengths: review. *Materials Science and Technology*, 2011, vol. 27, iss. 7, pp. 1101–1108. DOI: 10.1179/026708310X12815992418256.
4. Li L., Nagai K., Yin F. Progress in cold roll bonding of metals. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2008, vol. 9, p. 023001. DOI: 10.1088/1468-6996/9/2/023001.
5. Rezayat M., Akbarzadeh A. Bonding behavior of Al–Al₂O₃ laminations during roll bonding process. *Materials and Design*, 2012, vol. 36, pp. 874–879. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.048.
6. Tang C., Liu Z., Zhou D. Surface treatment with the cold roll bonding process for an aluminum alloy and mild steel. *Strength of Materials*, 2015, vol. 47, iss. 1, pp. 150–155. DOI: 10.1007/s11223-015-9641-3.
7. Arbo S.M., Westermann I., Holmedal B. Influence of stacking sequence and intermediate layer thickness in AA6082-IF steel tri-layered cold roll bonded composite sheets. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 767, pp. 316–322. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.767.316.
8. Gao C., Li L., Chen X., Zhou D., Tang C. The effect of surface preparation on the bond strength of Al–St strips in CRB process. *Materials and Design*, 2016, vol. 107, pp. 205–211. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.112.
9. Akdesir M., Zhou D., Foadian F., Palkowski H. Study of different surface pre-treatment methods on bonding strength of multilayer aluminum alloys/steel clad material. *International Journal of Engineering Research & Science*, 2016, vol. 2, iss. 1, pp. 169–177.
10. Bagheri A., Toroghinejad M.R., Taherizadeh A. Effect of roughness and surface hardening on the mechanical properties of three-layered brass/IF steel/brass composite. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, vol. 71, iss. 9, pp. 2199–2210. DOI: 10.1007/s12666-018-1351-7.
11. Liu J., Li M., Sheu S., Karabin M.E., Schultz R.W. Macro- and micro-surface engineering to improve hot roll bonding of aluminum plate and sheet. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 479, pp. 45–57. DOI: 10.1016/j.msea.2007.06.022.
12. Mikloweit A., Bambach M., Pietryga M., Hirt G. Development of a testing procedure to determine the bond strength in joining-by-forming processes. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 966–967, pp. 481–488. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.481.
13. Wang A., Ohashi O., Ueno K. Effect of surface asperity on diffusion bonding. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, iss. 1, pp. 179–184. DOI: 10.2320/matertrans.47.179.
14. Zhang Ch., Li H., Li M. Role of surface finish on interface grain boundary migration in vacuum diffusion bonding. *Vacuum*, 2017, vol. 137, pp. 49–55. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.12.021.
15. Wang Ch., Jiang Y., Xie J., Zhou D., Zhang X. Effect of the steel sheet surface hardening state on interfacial bonding strength of embedded aluminum–steel composite sheet produced by cold roll bonding process. *Materials Science & Engineering A*, 2016, vol. 652, pp. 51–58. DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.039.
16. Danesh Manesh H., Shahabi H.Sh. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 476, iss. 1–2, pp. 292–299. DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.08.081.
17. Jamaati R., Toroghinejad M.R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, iss. 2, pp. 191–197. DOI: 10.1007/s11665-010-9664-7.
18. Salikhyanov D. Contact mechanism between dissimilar materials under plastic deformation. *Comptes Rendus Mecanique*, 2019, vol. 347, pp. 588–600. DOI: 10.1016/j.crme.2019.07.002.
19. Bogatov A., Salikhyanov D. Development of bonding mechanisms for different materials during forming. *Metallurgist*, 2017, vol. 60, iss. 11–12, pp. 1175–1179. DOI: 10.1007/s11015-017-0424-x.
20. Burkin S.P., Babailov N.A., Ovsyannikov B.V. *Soprotivlenie deformatsii splavov Al i Mg* [Deformation resistance of Al and Mg alloys]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2010. 344 p. ISBN 978-5-321-01755-5.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Разработка экономичной конструкции коленчатого вала механического пресса с С-образной станиной на основании результатов анализа топологии

Даршан Тратия^{1, а, *}, Маноджкumar Шеладия^{1, b}, Ганшьям Ачарья^{1, c}, Шейли Ачарья^{2, d}

¹ Университет Атмия, г. Раджкот, 360005, Индия

² Технологический институт им. Сардара Валлабхай Пателя, филиал Гуджаратского технологического университета, г. Васада, 388306, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-0573-6880>,  tratiyadarshan@gmail.com, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-9154-3355>,  mvsheladiya@gmail.com,

^с  <https://orcid.org/0000-0002-3580-3116>,  ganshyam.acharya@atmiyauni.ac.in, ^д  <https://orcid.org/0000-0001-6428-8961>,  shailee.acharya@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.73+ 624.042

История статьи:

Поступила: 31 мая 2023

Рецензирование: 06 июня 2023

Принята к печати: 07 июля 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Расчет коленчатого вала

на прочность

Система автоматизированного

проектирования

Анализ методом конечных

элементов

Анализ топологии

Благодарности

Группа авторов глубоко признательна г-ну Аджиту Сингху Чавла, управляющему директору Singhal Power Presses Pvt. Ltd., Раджкот, Гуджарат, Индия, за предоставление поддержки и оборудования для исследовательской работы, а также г-ну Шиванга Джани, доценту кафедры машиностроения Университета Атмия, Раджкот, Гуджарат, Индия, за необходимое руководство.

АННОТАЦИЯ

Введение. Прессы представляют собой приводные механизмы со стационарными станинами и ползунами, которые передают скользящее движение по направлению к столу и от него, направляемое стойками. Механический пресс позволяет выполнять следующие операции с металлом: пробивку, вырезку, гибку, вытяжку и пр. Коленчатый вал является одним из основных компонентов передачи мощности, он преобразует вращательное движение привода в поступательное движение ползуна. Именно вокруг этого элемента и сосредоточены все напряжения и деформации. **Цель исследования:** рационализация конструкции коленчатого вала с учетом прочностных характеристик стоек, соединительных винтов и стяжных колонок. **Методы** включают в себя два этапа разработки конструкции коленчатого вала: 1) создание модели посредством автоматизированного проектирования; 2) анализ методом конечных элементов в программе Ansys-22R1. Существующая, а также улучшенная конструкции коленчатого вала исследованы методом КЭА с анализом топологии. Топология является частью КЭ-анализа, а также генеративного проектирования. **Результаты и обсуждения.** Конструкция коленчатого вала, включающая в себя подшипниковый узел, во многом зависит от максимального давления, которое будет создано в нижней точке хода, и это тщательно учитывается при проектировании других частей прессов. На основе результатов анализа топологии конструкции коленчатого вала было выявлено, что увеличение прочности данного конструктивного элемента возможно за счет добавления дополнительного материала в области потенциального разрушения. В ходе исследования удалось разработать рациональную конструкцию коленчатого вала с повышенными механическими свойствами по сравнению с существующей конструкцией, что позволит увеличить срок службы коленчатого вала, предотвращая его выход из строя.

Для цитирования: Разработка экономичной конструкции коленчатого вала механического пресса с С-образной станиной на основании результатов анализа топологии / Д.К. Тратия, М.В. Шеладия, Г.Д. Ачарья, Ш.Г. Ачарья // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 50–62. – DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.3-50-62.

*Адрес для переписки

Тратия Даршан Камлешхай, к.т.н., научный сотрудник
Университет Атмия,
360005, г. Раджкот, Индия
Тел.: +91-9974364458, e-mail: tratiyadarshan@gmail.com

Введение

Прессы представляют собой приводные механизмы со стационарными станинами и ползунами, которые передают скользящее движение по направлению к столу и от него, направляемое стойками. С помощью механических прессов

металл можно обрабатывать самыми разными методами. Обычно одну и ту же операцию, необходимую для конкретной детали, можно выполнить несколькими способами [1–4]. Прессы с давних времен используются практически во всех сферах деятельности, касающихся обработки различных материалов в холодном или горячем состоянии: для прессования, дробления, формования, нанесения покрытий, раздачи. В любом случае благодаря технологическим свойствам металлов и их широкому ассортименту к ним можно применять широкий спектр технологических операций [4].

Длина хода приводного пресса зависит от эксцентриситета коленчатого вала. На рис. 1 представлена полная номенклатура приводного пресса [1].

Такой пресс используется для быстрого, точного и экономичного производства большого количества изделий путем холодной обработки мягкой стали и других пластичных материалов. Прессы классифицируются по количеству действий (простого, двойного, тройного действия и т. д.); направлению движения штампа (вертикальное, горизонтальное, наклонное и др.);

виду энергии, используемой для приведения в действие штампов (механическая или гидравлическая); типу передаточных механизмов (кривошипные, поворотные, фрикционные, винтовые, рычажные и др.) [2].

Коленчатый вал можно назвать основным конструктивным элементом пресса: именно он воспринимает все напряжения и деформации. Прочность рамы и стоек, шатуна, рулевых тяг, соединительных винтов, стяжных колонок и других важных деталей зависит от эксплуатационных характеристик коленчатого вала. **Целью исследований** является рационализация конструкции коленчатого вала с учетом прочностных характеристик стоек, соединительных винтов и стяжных колонок.

Конструкция коленчатого вала, включая расположение подшипников, во многом зависит от максимального давления, которое может быть создано в нижней части хода, что показано на рис. 2. Стандартные коленчатые валы изготавливают из углеродистых, хромомарганцевых, хромоникельмолибденовых и других сталей, а также из специальных высокопрочных чугунов. Для тяжело нагруженных коленчатых валов исполь-

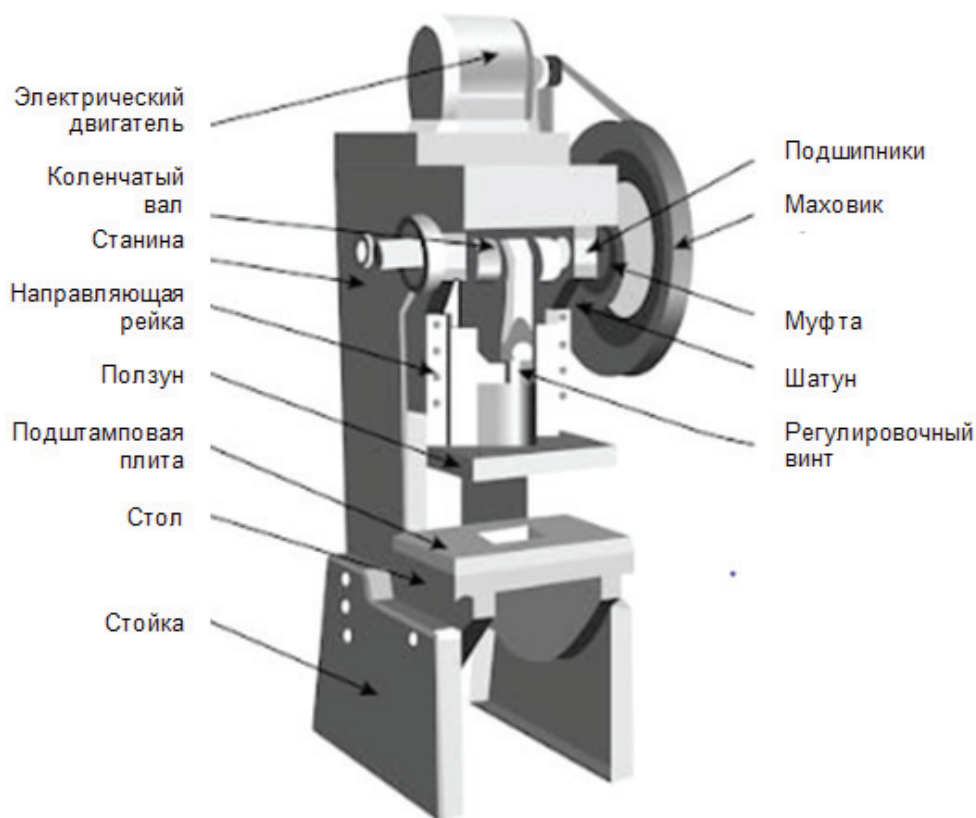


Рис. 1. Устройство приводного пресса

Fig. 1. Press machine arrangement

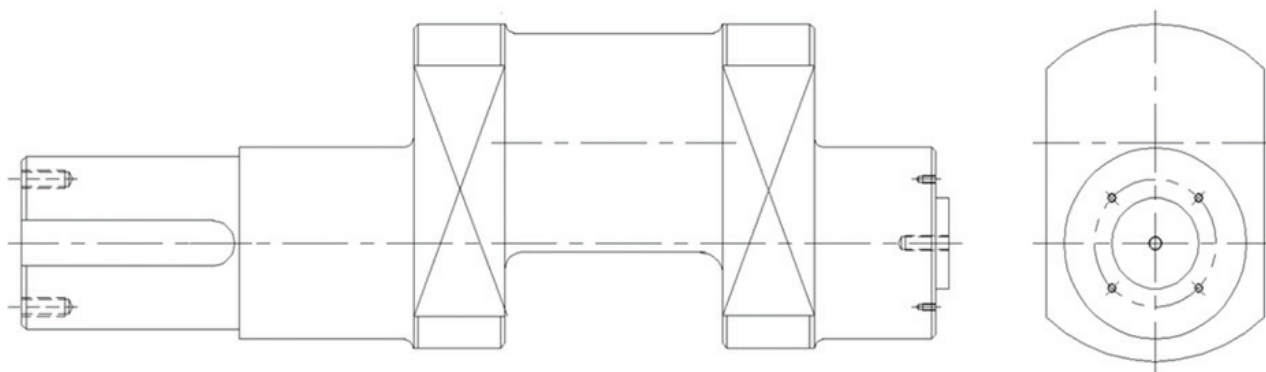


Рис. 2. Компонировка коленчатого вала

Fig. 2. Crankshaft layout

зуют сталь марок 40ХН2МА, 20ХН3А, 18ХНВА, 25ХГТ и др. После штамповки перед механической обработкой заготовки валов подвергают термической обработке (ТО). Для тяжело нагруженного вала обычно применяют следующие режимы ТО: нормализация, закалка + высокий отпуск (улучшение).

Временное сопротивление разрушению и предел упругости вала в некоторых случаях могут быть значительно повышены за счет специальной термообработки. Могут также использоваться специальные марки стали с более высоким пределом упругости, чем у стандартных валов. Однако в большинстве случаев термическая обработка или специальные стали не требуются. Следует учитывать, что термическая обработка или специальные стали часто повышают прочность коленчатого вала, и она существенно превосходит прочность остальных деталей.

Методика исследований

Все исследования конструкции коленчатого вала были развиты на два этапа разработки данного конструктивного элемента: 1) создание 3D-модели посредством систем автоматизированного проектирования; 2) анализ методом конечных элементов в программе Ansys-22R1. Существующая, а также улучшенная конструкции коленчатого вала исследованы методом конечных элементов (МКЭ) с анализом топологии. Топология является частью КЭ-анализа, а также генеративного проектирования, т. е. технологии, при которой 3D-модели создаются и оптимизируются с помощью облачных вычислений и искусственного интеллекта [2–14]. Любое физическое явление, такое как поведение структур

или жидкостей, теплопередача, распространение волн, образование биологических клеток и другие, должно быть полностью понято и количественно оценено с помощью математики. Дифференциальные уравнения в частных производных (ДУЧП) часто используются для описания большинства перечисленных процессов. Однако за последние несколько десятилетий были разработаны численные методы, позволяющие компьютеру решать эти ДУЧП. Одним из наиболее известных численных подходов является анализ методом конечных элементов (КЭА).

Метод конечных элементов – это численный метод, используемый КЭА, который имитирует любое заданное физическое состояние. Инженеры пользуются программным обеспечением для анализа методом конечных элементов с целью ускорения разработки более качественных изделий при одновременном снижении затрат за счет сведения к минимуму потребности в физических моделях и натурных экспериментах, а также оптимизации компонентов в процессе проектирования.

Результаты и их обсуждение

Анализ методом конечных элементов существующего коленчатого вала с помощью Ansys-22R1

По точному двумерному чертежу была создана объективная трехмерная параметрическая геометрия коленчатого вала механического привода пресса с использованием CAD-системы (системы автоматизированного проектирования), например, программного комплекса Pro/

Engineer. Для использования в структурном моделировании существующего проекта эта объемная геометрия была импортирована в .STEP-формат. В настоящее время Singhal Power Presses Pvt. Ltd. собирает данные по конструкции коленчатого вала механического пресса именно в таком формате. Для создания модели, показанной на рис. 3, использовался программный продукт Creo-5.2, который позволяет создать файлы по стандарту .STEP [15–18].

Выделенная область на рис. 4 показывает результаты общей деформации после приложения силы 320 т к центру коленчатого вала. Максимальная деформация приходится на середину коленчатого вала, где действует нагрузка 320 т, а величина деформации составляет 0,050 мм, тогда как прогиб в районе подшипника практически равен 0 мм.

На рис. 5 показано эквивалентное напряжение в углах возле щеки коленчатого вала при нагрузке 320 т с максимальным значением 162,05 МПа и минимальным 9,64 МПа в зоне подшипника.

Из рис. 6 очевидно, что при приложении нагрузки в 320 т коленчатый вал испытывает наибольшее растяжение, при этом максимальное напряжение сдвига составляет 93,008 МПа, а минимальное напряжение сдвига равно 0,106 МПа.

При приложении нагрузки силой 320 т область подшипника коленчатого вала испытывает максимальное напряжение (рис. 7). Максимальное главное напряжение здесь составляет 132,01 МПа, а минимальное главное напряжение составляет –58,67 МПа, вызывая отрицательные напряжения на торцевой поверхности.

Результаты собраны для анализа в табл. 1.

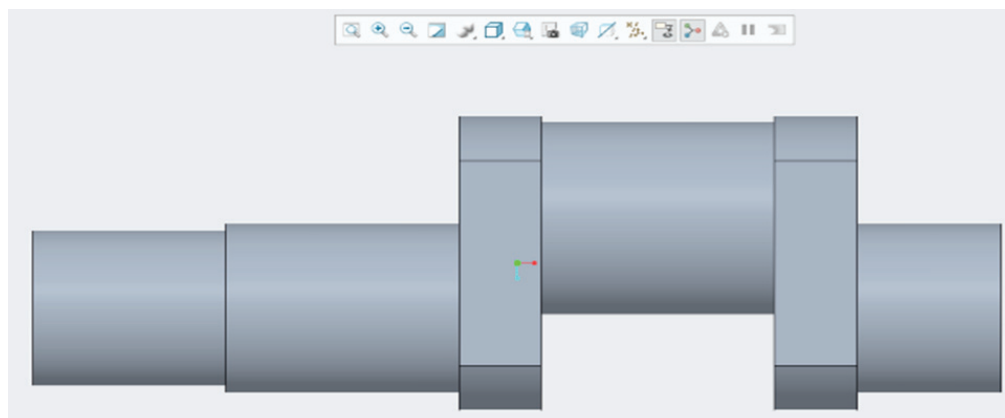


Рис. 3. Конструкция существующего коленчатого вала

Fig. 3. Existing design of crankshaft

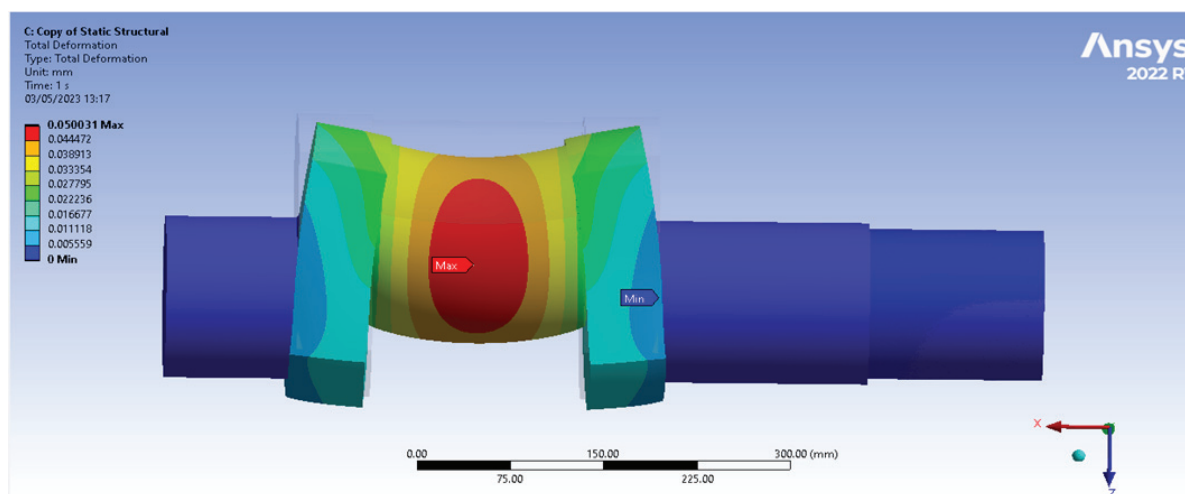


Рис. 4. Полная деформация в существующем коленчатом валу

Fig. 4. Total deformation of existing crankshaft

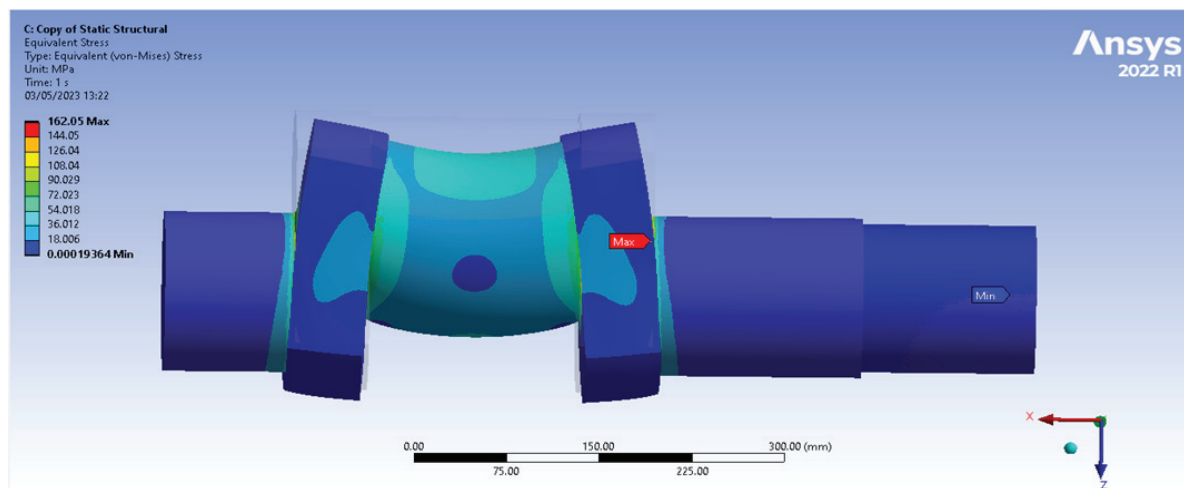


Рис. 5. Эквивалентное напряжение в существующем коленчатом валу

Fig. 5. Equivalent stress of existing crankshaft

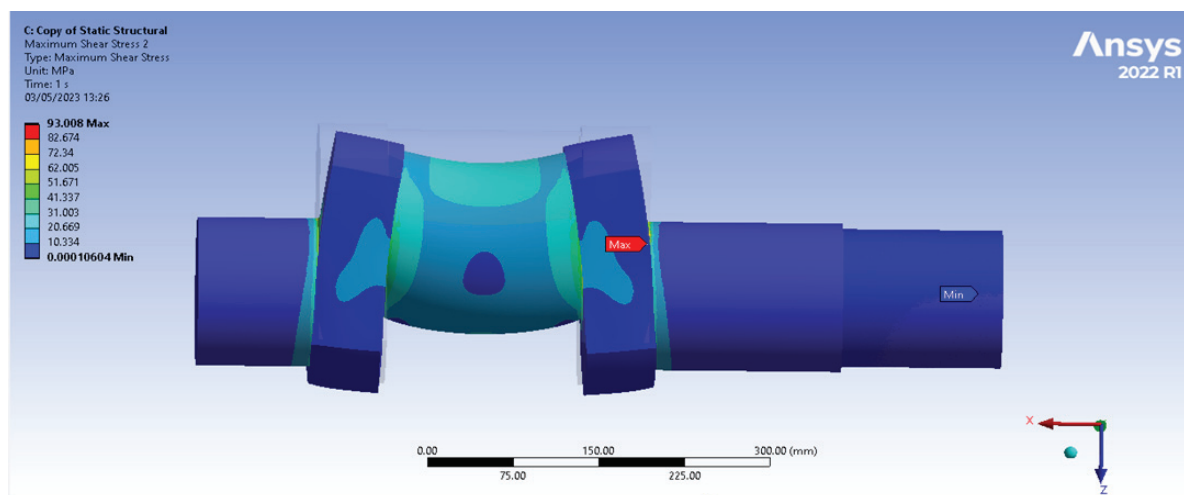


Рис. 6. Максимальное напряжение сдвига в существующем коленчатом валу

Fig. 6. Maximum shear stress in existing crank shaft

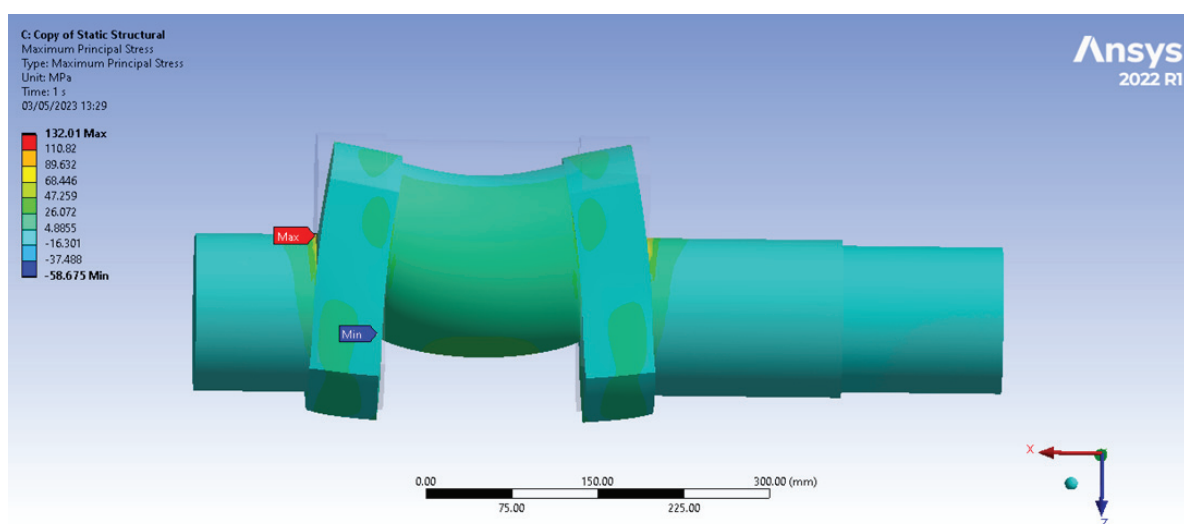


Рис. 7. Максимальное главное напряжение в существующем коленчатом валу

Fig. 7. Maximum principal stress in existing crankshaft

Анализ результатов расчета существующего коленчатого вала
Structural analysis results of existing crankshaft

Общее смещение, мм	Теория напряжений по Мизесу, МПа	Максимальное главное напряжение, МПа	Максимальное напряжение сдвига, МПа
0,050	162,05	132,01	93,008

**Анализ методом конечных элементов
оптимизированного коленчатого вала
с использованием Ansys-22R1**

Очевидно, что практически каждый компонент кинематической цепи в сборке, для которого не была проведена топологическая оптимизация, обладает избыточным весом. Дополнительный вес конструктивных элементов приводит к использованию излишнего материала, что является причиной формирования чрезмерной нагрузки на движущиеся компоненты, снижения энергоэффективности и увеличения транспортных расходов [19–25]. Благодаря технологии топологической оптимизации (ANSYS Mechanical) появляется инструмент, необходимый для проектирования прочных и легких конструктивных элементов независимо от сферы их использования. Можно с легкостью определить цели и применить средства управления, чтобы обеспечить соблюдение производственных тре-

бований, установить минимальную толщину материала и определить области исключения [26–29].

Оптимизация топологии в ANSYS Mechanical позволяет:

- 1) учесть множественные статические нагрузки в сочетании с оптимизацией собственных частот (модальный анализ);
- 2) выполнить требования к минимальной толщине материала;
- 3) соблюсти правила, касающиеся направления базирования (установки) элемента (например, для операций механической обработки);
- 4) получить возможность реализации как циклической, так и плоской симметрии.

Выделенная область на рис. 8 отражает результаты общей деформации после приложения нагрузки в 320 т к центру коленчатого вала. Максимальная деформация приходится на середину коленчатого вала, где и приложена на-

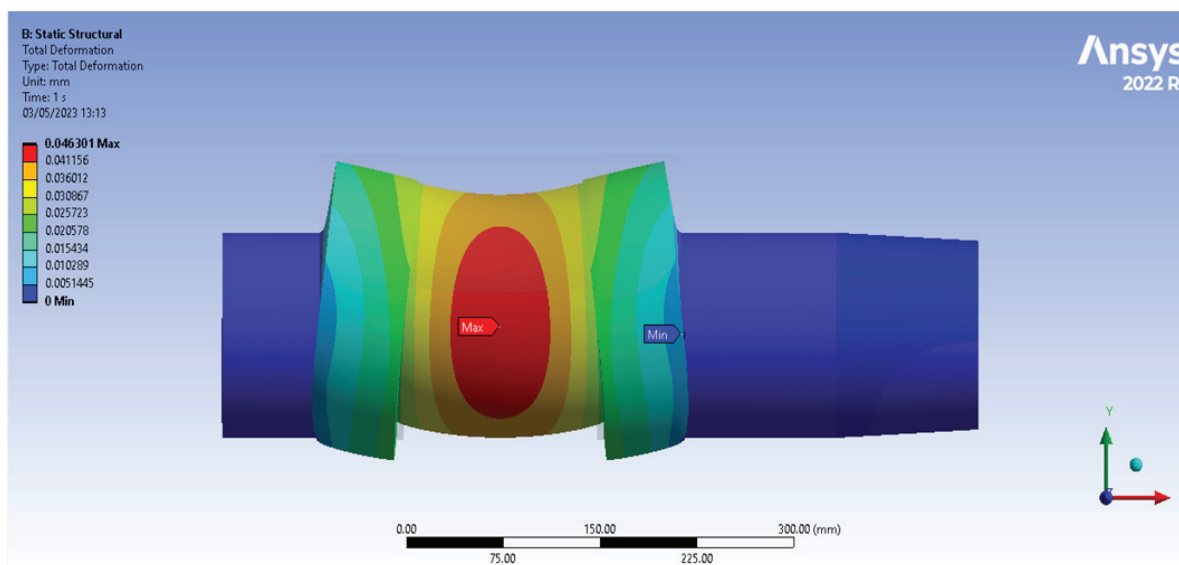


Рис. 8. Полная деформация в оптимизированном коленчатом валу

Fig. 8. Total deformation of optimized crankshaft

грузка 320 т, а величина деформации составляет 0,046 мм, но прогиб в области подшипника практически равен 0 мм.

На рис. 9 показано эквивалентное напряжение в местах торцевых поверхностей коленчатого вала. При приложении нагрузки в 320 т коленчатый вал испытывает самые высокие напряжения на торцевых поверхностях с максимальным эквивалентным напряжением 191,24 МПа, при этом минимальное эквивалентное напряжение возникает в области подшипника и равно 11,64 МПа.

При приложении нагрузки в 320 т область подшипника коленчатого вала испытывает мак-

симальное напряжение (рис. 10). Максимальное главное напряжение в этом месте равно 189 МПа, а минимальное главное напряжение на торцевой поверхности составляет –11,27 МПа, вызывая отрицательное напряжение.

Из рис. 11 очевидно, что максимальные напряжения возникают в углу коленчатого вала при приложении нагрузки 320 т, причем максимальное напряжение сдвига составляет 98,124 МПа, а минимальное напряжение сдвига равно 0,2156 МПа.

Результаты для анализа собраны в табл. 2. Сравнение существующего и оптимизированного коленчатых валов представлено в табл. 3.

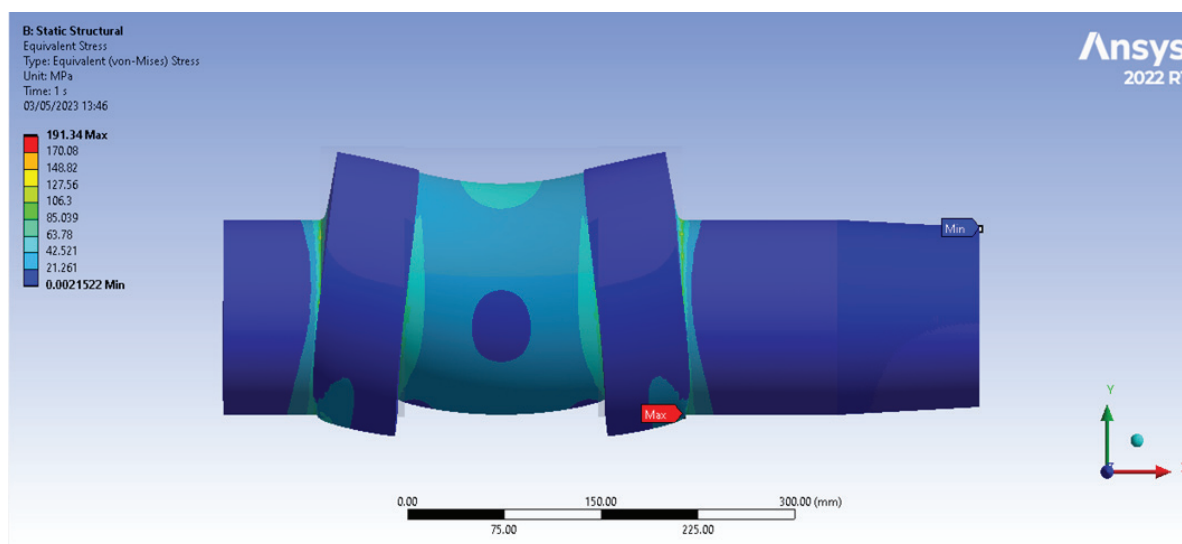


Рис. 9. Эквивалентное напряжение в оптимизированном коленчатом валу

Fig. 9. Equivalent stress in optimized crankshaft

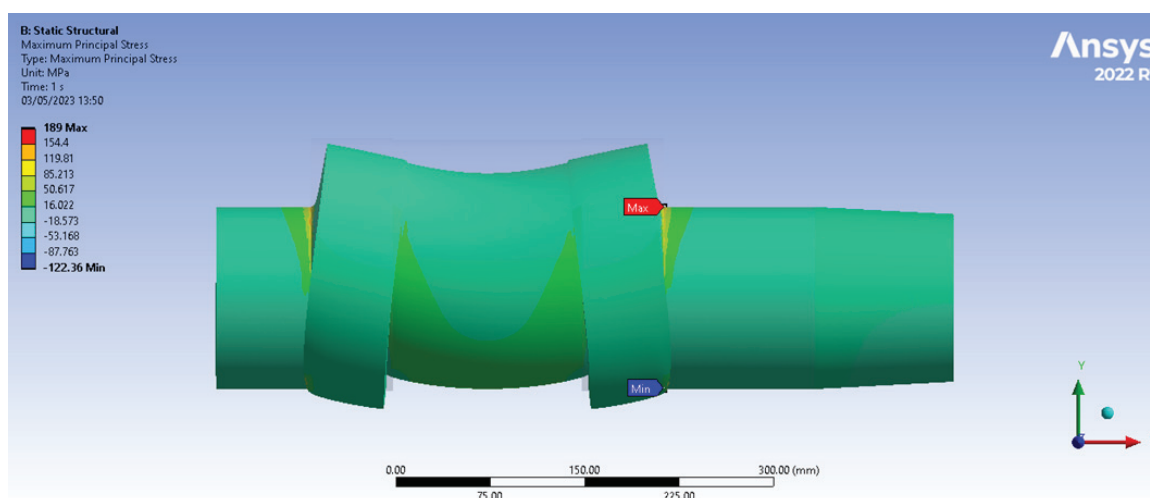


Рис. 10. Максимальное главное напряжение в оптимизированном коленчатом валу

Fig. 10. Maximum principal stress in optimized crankshaft

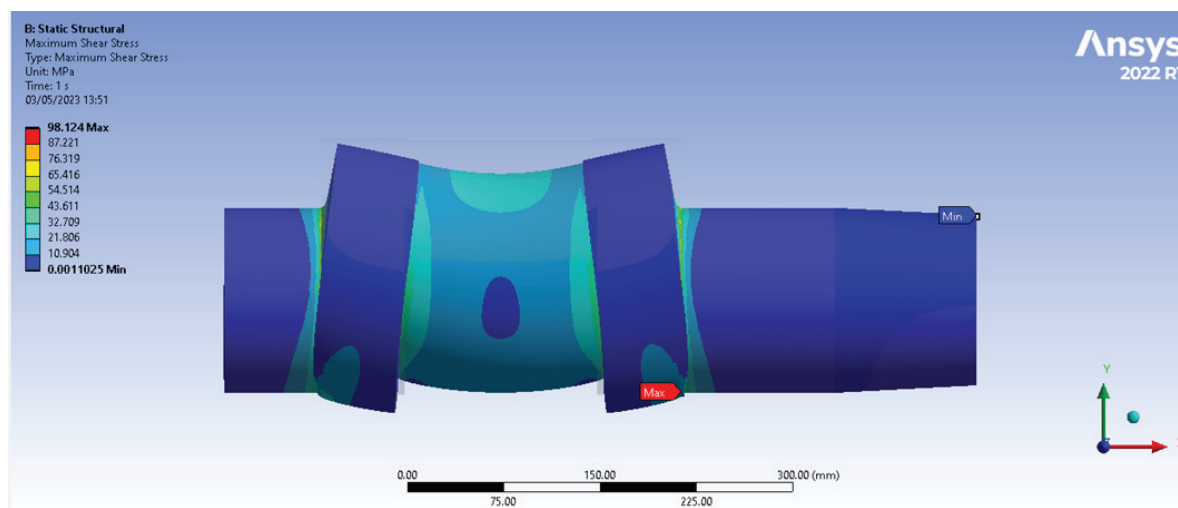


Рис. 11. Максимальное напряжение сдвига в оптимизированном коленчатом валу

Fig. 11. Maximum shear stress in optimized crankshaft

Таблица 2

Table 2

Анализ результатов расчета оптимизированного коленчатого вала

Structural analysis results of optimized crankshaft

Общее смещение, мм	Теория напряжений по Мизесу, МПа	Максимальное главное напряжение, МПа	Максимальное напряжение сдвига, МПа
0,0463	191,34	189	98,124

Таблица 3

Table 3

Сравнение существующего и оптимизированного коленчатых валов

Comparison of the existing and optimized crankshaft

Параметр	Существующий коленчатый вал	Оптимизированный коленчатый вал	Процентное соотношение. Улучшение результатов
Общее смещение, мм	0,050	0,0463	7,45 %
Теория напряжений по Мизесу, МПа	162,05	191,34	15,30 %
Максимальное главное напряжение, МПа	132,01	189	30,15 %
Максимальное напряжение сдвига, МПа	93,008	98,124	5,21 %

Выводы

Из результатов, полученных методом конечных элементов как по существующей конструкции коленчатого вала, так и по модифицированной, можно сделать вывод, что оптимизация

конструкции коленчатого вала механического пресса приводит к повышению его эксплуатационных показателей с точки зрения уменьшения отклонения изгиба на 4 мкм по сравнению с предыдущей конструкцией. Кроме того, по данным табл. 3, модифицированная конструкция колен-

чатого вала показывает улучшенные результаты: по Мизесу – 15,30 %, максимальное основное напряжение – 30,15 % и максимальное напряжение сдвига – 5,21 %.

Список литературы

1. *Montazersadgh F.H., Fatemi A.* Dynamic load and stress analysis of a crankshaft. SAE Technical Paper. – SAE International, 2007. – DOI: 10.4271/2007-01-0258.
2. *Shahane V.C., Pawar R.S.* Optimization of the crankshaft using finite element analysis approach // *Automotive and Engine Technology*. – 2017. – Vol. 2 (1–4). – P. 1–23.
3. *Garg R., Baghla S.* Finite element analysis and optimization of crankshaft design // *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*. – 2012. – Vol. 2 (6). – P. 26–31.
4. Failure mode analysis of two crankshafts of a single cylinder diesel engine / M. Fonte, P. Duarte, L. Reis, M. Freitas, V. Infante // *Engineering Failure Analysis*. – 2015. – Vol. 56. – P. 185–193.
5. *Meng J., Liu Y., Liu R.* Finite element analysis of 4-cylinder diesel crankshaft // *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*. – 2011. – Vol. 3 (5). – P. 22–29.
6. *Sachs J.D.* From millennium development goals to sustainable development goals // *The Lancet*. – 2012. – Vol. 379 (9832). – P. 2206–2211.
7. *Ban K.M.* Sustainable development goals // *News Survey*. – 2016. – Vol. 37 (02). – P. 18–19.
8. *Benjeddou A.* Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey // *Computers & Structures*. – 2000. – Vol. 76 (1–3). – P. 347–363.
9. *Gu Y., Zhou Z.* Strength analysis of diesel engine crankshaft based on PRO/E and ANSYS // 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – IEEE, 2011. – Vol. 3. – P. 362–364.
10. *Khichadia B.N., Chauhan D.M.* A review on design and analysis of mechanical press frame // *International Journal of Advance Engineering and Research Development*. – 2014. – Vol. 1 (6). – P. 1–7.
11. *More R.S., Kulkarni S.R.* Finite element analysis and optimization of ‘c’Types // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. – 2015. – Vol. 2 (3). – P. 1385–1391.
12. *Dar F.H., Meakin J.R., Aspden R.M.* Statistical methods in finite element analysis // *Journal of Biomechanics*. – 2002. – Vol. 35 (9). – P. 1155–1161.
13. *Halicioglu R., Dulger L.C., Bozdana A.T.* Mechanisms, classifications, and applications of servo presses: A review with comparisons // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2016. – Vol. 230 (7). – P. 1177–1194.
14. *More S.T., Bindu R.S.* Effect of mesh size on finite element analysis of plate structure // *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 181–185.
15. *Choi K.S., Pan J.* Simulations of stress distributions in crankshaft sections under fillet rolling and bending fatigue tests // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – Vol. 31 (3). – P. 544–557.
16. Evaluation of FEM based fracture mechanics technique to estimate life of an automotive forged steel crankshaft of a single cylinder diesel engine / R.M. Metkar, V.K. Sunnapwar, S.D. Hiwase, V.S. Anki, M. Dumpa // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 51. – P. 567–572.
17. *Guangming Z., Zhengfeng J.* Study on torsional stiffness of engine crankshaft // 2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications. – IEEE, 2009. – Vol. 3. – P. 431–435. – DOI: 10.1109/IF-CSTA.2009.345.
18. SDG 12: Responsible consumption and production – Potential Benefits and impacts on forests and livelihoods / P. Schröder, A.S. Antonarakis, J. Brauer, A. Conteh, R. Kohsaka, Y. Uchiyama, P. Pacheco // *Sustainable development goals: their impacts on forests and people*. – Cambridge University Press, 2019. – P. 386–418.
19. Experimental and analytical modal analysis of a Crankshaft / C. Azoury, A. Kallassy, B. Combes, I. Moukarzel, R. Boudet // *IOSR Journal of Engineering*. – 2012. – Vol. 2 (4). – P. 674–684.
20. Analysis of piston, connecting rod and crank shaft assembly / G. Gopal, L.S. Kumar, K.V.B. Reddy, M.U.M. Rao, G. Srinivasulu // *Materials Today: Proceedings*. – 2017. – Vol. 4 (8). – P. 7810–7819.
21. Optimization of a crankshaft rolling process for durability / S. Ho, Y.L. Lee, H.T. Kang, C.J. Wang // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – Vol. 31 (5). – P. 799–808.
22. Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine / L. Witek, M. Sikora, F. Stachowicz, T. Trzpiecinski // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – Vol. 82. – P. 703–712.
23. *Halicioglu R., Dulger L.C., Bozdana A.T.* Structural design and analysis of a servo crank press // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2016. – Vol. 19 (4). – P. 2060–2072.
24. Research perspectives on responsible tourism / B. Bramwell, B. Lane, S. McCabe, J. Mosedale, C. Scarles // *Journal of Sustainable Tourism*. – 2008. – Vol. 16 (3). – P. 253–257. – DOI: 10.1080/09669580802208201.



25. Predicting environmentally responsible apparel consumption behavior of future apparel industry professionals: The role of environmental apparel knowledge, environmentalism and materialism / A. Sadachar, F. Feng, E.E. Karpova, S. Manchiraju // *Journal of Global Fashion Marketing*. – 2016. – Vol. 7 (2). – P. 76–88.

26. *Miola A., Schiltz F.* Measuring sustainable development goals performance: How to monitor policy action in the 2030 Agenda implementation? // *Ecological Economics*. – 2019. – Vol. 164. – P. 106373.

27. *Boto-Álvarez A., García-Fernández R.* Implementation of the 2030 agenda sustainable development

goals in Spain // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12 (6). – P. 2546.

28. *Boluk K.A., Cavaliere C.T., Higgins-Desbiolles F.* A critical framework for interrogating the United Nations Sustainable Development Goals 2030 Agenda in tourism // *Journal of Sustainable Tourism*. – 2019. – Vol. 27 (7). – P. 847–864. – DOI: 10.1080/09669582.2019.1619748.

29. A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions / P. Pradhan, L. Costa, D. Rybski, W. Lucht, J.P. Kropp // *Earth's Future*. – 2017. – Vol. 5 (11). – P. 1169–1179.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Economical crankshaft design through topology analysis for C type gap frame power press SNX-320

Darshan Tratiya^{1, a, *}, Manojkumar Sheladiya^{1, b}, Ghanshyam Acharya^{1, c}, Shailee Acharya^{2, d}

¹ Atmiya University, Yogidham Gurukul, Kalawad Road, Rajkot, 360005, India

² Sardar Vallabhbhai Patel Institute of Technology, Affiliated to GTU, Vasad, 388306, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-0573-6880>, tratiyadarshan@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9154-3355>, mvsheladiya@gmail.com,

^c <https://orcid.org/0000-0002-3580-3116>, ghanshyam.acharya@atmiyauni.ac.in, ^d <https://orcid.org/0000-0001-6428-8961>, shailee.acharya@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 May 2023

Revised: 06 June 2023

Accepted: 07 July 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Crankshaft structural analysis

Computer-aided design

Finite element analysis

Topology analysis

Acknowledgements

The group of authors is highly obliged to Mr. Ajit Singh Chawla, Managing Director, Singhal power presses Pvt. Ltd., Rajkot, Gujarat, India for providing support and facilities for the research work and Mr. Shivang Jani, Asst. Prof. Department of Mechanical Engineering, Atmiya University, Rajkot, Gujarat, India for necessary guidance.

ABSTRACT

Introduction. The presses are powered machines having stationary beds and slides (rams) which have controlled sliding motion towards and away from the beds, guided by the frames. Metal can be worked in power press in a wide variety of ways like punching, shearing, forming, etc. Crankshaft is one of the basic components for power transmission, which transmits rotary motion to sliding motion in the mechanical power press. It is around this element that all stresses and deformations are concentrated. **The purpose** of the study: rationalization of the design of the crankshaft, taking into account the strength characteristics of the frame, connection screws, tie rods. **The methods** include two stages of crankshaft design development: 1) modelling in parametric cad software; 2) *FE* analysis in *Ansys-22R1*. The existing as well as the improved design of the crankshaft was investigated by the *FE* method with topology analysis. Topology is part of *FE* analysis as well as *Generative design*. **Result and Discussion.** The design of the crankshaft, including the bearing assembly, depends largely on the maximum pressure that will be generated at the bottom of the stroke, and this is carefully considered when designing other parts of the presses. Based on the results of the topology analysis of the crankshaft structure, it was found that an increase in the strength of this structural element is possible by adding additional material in the area of potential destruction. During the study, it was possible to develop a rational design of the crankshaft with improved mechanical properties compared to the existing one, which will increase the service life of the crankshaft, preventing its failure.

For citation: Tratiya D.K., Sheladiya M.V., Acharya G.D., Acharya S.G. Economical crankshaft design through topology analysis for C type gap frame power press SNX-320. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 50–62. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-50-62. (In Russian).

References

1. Montazersadgh F.H., Fatemi A. *Dynamic load and stress analysis of a crankshaft*. SAE Technical Paper. SAE International, 2007. DOI: 10.4271/2007-01-0258.
2. Shahane V.C., Pawar R.S. Optimization of the crankshaft using finite element analysis approach. *Automotive and Engine Technology*, 2017, vol. 2 (1–4), pp. 1–23.

* Corresponding author

Tratiya Darshan K., Ph.D. (Engineering), Research Scientist
 Atmiya University,
 Yogidham Gurukul, Kalawad Road,
 360005, Rajkot, Gujarat, India.
 Tel.: +91-9974364458, e-mail: tratiyadarshan@gmail.com

3. Garg R., Baghla S. Finite element analysis and optimization of crankshaft design. *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*, 2012, vol. 2 (6), pp. 26–31.
4. Fonte M., Duarte P., Reis L., Freitas M., Infante V. Failure mode analysis of two crankshafts of a single cylinder diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, 2015, vol. 56, pp. 185–193.
5. Meng J., Liu Y., Liu R. Finite element analysis of 4-cylinder diesel crankshaft. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2011, vol. 3 (5), pp. 22–29.
6. Sachs J.D. From millennium development goals to sustainable development goals. *The Lancet*, 2012, vol. 379 (9832), pp. 2206–2211.
7. Ban K.M. Sustainable development goals. *News Survey*, 2016, vol. 37 (02), pp. 18–19.
8. Benjeddou A. Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey. *Computers & Structures*, 2000, vol. 76 (1–3), pp. 347–363.
9. Gu Y., Zhou Z. Strength analysis of diesel engine crankshaft based on PRO/E and ANSYS. *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. IEEE, 2011, vol. 3, pp. 362–364.
10. Khichadia B.N., Chauhan D.M. A review on design and analysis of mechanical press frame. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2014, vol. 1 (6), pp. 1–7.
11. More R.S., Kulkarni S.R. Finite element analysis and optimization of ‘c’Types. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2015, vol. 2 (3), pp. 1385–1391.
12. Dar F.H., Meakin J.R., Aspden R.M. Statistical methods in finite element analysis. *Journal of biomechanics*, 2002, vol. 35 (9), pp. 1155–1161.
13. Halicioglu R., Dulger L.C., Bozdana A.T. Mechanisms, classifications, and applications of servo presses: A review with comparisons. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, vol. 230 (7), pp. 1177–1194.
14. More S.T., Bindu R.S. Effect of mesh size on finite element analysis of plate structure. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2015, vol. 4 (3), pp. 181–185.
15. Choi K.S., Pan J. Simulations of stress distributions in crankshaft sections under fillet rolling and bending fatigue tests. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31 (3), pp. 544–557.
16. Metkar R.M., Sunnapwar V.K., Hiwase S.D., Anki V.S., Dumpa M. Evaluation of FEM based fracture mechanics technique to estimate life of an automotive forged steel crankshaft of a single cylinder diesel engine. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 51, pp. 567–572.
17. Guangming Z., Zhengfeng J. Study on torsional stiffness of engine crankshaft. *2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications*. IEEE, 2009, vol. 3, pp. 431–435. DOI: 10.1109/IFCSTA.2009.345.
18. Schröder P., Antonarakis A.S., Brauer J., Conteh A., Kohsaka R., Uchiyama Y., Pacheco P. SDG 12: Responsible consumption and production – Potential Benefits and impacts on forests and livelihoods. *Sustainable development goals: their impacts on forests and people*. Cambridge University Press, 2019, pp. 386–418.
19. Azoury C., Kallassy A., Combes B., Moukarzel I., Boudet R. Experimental and analytical modal analysis of a Crankshaft. *IOSR Journal of Engineering*, 2012, vol. 2 (4), pp. 674–684.
20. Gopal G., Kumar L.S., Reddy K.V.B., Rao M.U.M., Srinivasulu G. Analysis of piston, connecting rod and crank shaft assembly. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4 (8), pp. 7810–7819.
21. Ho S., Lee Y.L., Kang H.T., Wang C.J. Optimization of a crankshaft rolling process for durability. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31 (5), pp. 799–808.
22. Witek L., Sikora M., Stachowicz F., Trzepieciniski T. Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 82, pp. 703–712.
23. Halicioglu R., Dulger L.C., Bozdana A.T. Structural design and analysis of a servo crank press. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016, vol. 19 (4), pp. 2060–2072.
24. Bramwell B., Lane B., McCabe S., Mosedale J., Scarles C. Research perspectives on responsible tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, 2008, vol. 16 (3), pp. 253–257. DOI: 10.1080/09669580802208201.
25. Sadachar A., Feng F., Karpova E.E., Manchiraju S. Predicting environmentally responsible apparel consumption behavior of future apparel industry professionals: The role of environmental apparel knowledge, environmentalism and materialism. *Journal of Global Fashion Marketing*, 2016, vol. 7 (2), pp. 76–88.
26. Miola A., Schiltz F. Measuring sustainable development goals performance: How to monitor policy action in the 2030 Agenda implementation? *Ecological Economics*, 2019, vol. 164, p. 106373.

27. Boto-Álvarez A., García-Fernández R. Implementation of the 2030 agenda sustainable development goals in Spain. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (6), p. 2546.
28. Boluk K.A., Cavaliere C.T., Higgins-Desbiolles F. A critical framework for interrogating the United Nations Sustainable Development Goals 2030 Agenda in tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, 2019, vol. 27 (7), pp. 847–864. DOI: 10.1080/09669582.2019.1619748.
29. Pradhan P., Costa L., Rybski D., Lucht W., Kropp J.P. A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions. *Earth's Future*, 2017, vol. 5 (11), pp. 1169–1179.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Рационализация режимов поверхностной закалки ВЭН ТВЧ рабочих поверхностей пуансона в условиях гибридной обработки

Вадим Скиба^{1, а, *}, Никита Вахрушев^{1, b}, Кристина Титова^{1, c}, Алексей Черников^{2, 1, d}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² ОАО «ГЛК-Промышленные технологии», ул. Большевикская, 177, цех 16, г. Новосибирск, 630083, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeeba_vadim@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2708-3171>, krispars@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>, aleksey.chernikov.97@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06(07): 621.785

История статьи:

Поступила: 14 июня 2023

Рецензирование: 14 июля 2023

Принята к печати: 27 июля 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Гибридное оборудование
Многолезвийная механическая обработка
Высокоэнергетический нагрев
Резание
Индукционная закалка

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00945, <https://rscf.ru/project/23-29-00945/>.

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие кластера гибридных металлообрабатывающих систем в станкостроении сопряжено с рядом позитивных последствий. Во-первых, такие системы помогают сократить затраты на производство путем оптимизации использования ресурсов и энергии. Это особенно актуально в условиях повышенной конкуренции и стремления к экономии. Во-вторых, гибридные системы обеспечивают возможность производства качественной продукции с повышенной производительностью. Благодаря интеграции различных функций в одном технологическом оборудовании процессы металлообработки становятся более эффективными и точными. Это позволяет снизить количество брака и повысить качество конечной продукции. Кроме того, гибридные металлообрабатывающие системы обладают автономной функциональностью, что особенно важно в гибком машиностроительном производстве, где требуется быстрая переналадка и адаптация к различным производственным задачам. Таким образом, гибридные металлообрабатывающие системы представляют собой важный шаг в развитии современного машиностроения, способствующий сокращению затрат, повышению производительности и обеспечению высокого качества продукции. **Цель данной работы** заключается в повышении производительности и снижении энергозатрат при поверхностно-термическом упрочнении деталей машин посредством использования концентрированных источников энергии в условиях интегральной обработки. **Теория и методы.** Для достижения поставленной цели были проведены исследования возможного структурного состава и компоновки гибридного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические процессы. При разработке теории и методов были учтены основные положения структурного синтеза и компонентности металлообрабатывающих систем. Теоретические исследования основаны на применении системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей и конструирования металлообрабатывающих станков. Эксперименты проводились на модернизированном многоцелевом обрабатывающем центре MC 032.06, оснащённом дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10 с рабочей частотой тока 440 кГц, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Структурные исследования производили с применением оптической и растровой микроскопии. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали оценивали посредством механического и рентгеновского методов определения остаточных напряжений. Микротвердость упрочнённого поверхностного слоя деталей оценивали на приборе Wolpert Group 402MVD. **Результаты и обсуждение.** Представлена оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. Разработаны методологические рекомендации по модернизации металлорежущих станков, позволяющие осуществить высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) на стандартной станочной системе и создать наукоемкое технологическое оборудование с расширенными функциональными возможностями. Экспериментально подтверждено, что внедрение предлагаемого гибридного станка в производство в сочетании с рекомендациями по назначению режимов ВЭН ТВЧ при интегральной обработке деталей типа «пуансон» позволяет увеличить производительность поверхностной закалки в 36–40 раз и снизить энергозатраты в 6 раз.

Для цитирования: Рационализация режимов поверхностной закалки ВЭН ТВЧ рабочих поверхностей пуансона в условиях гибридной обработки / В.Ю. Скиба, Н.В. Вахрушев, К.А. Титова, А.Д. Черников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 63–86. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-63-86.

*Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент, с.н.с.

Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,

г. Новосибирск, 630073, Россия

Тел.: +7 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

В промышленно развитых странах объем продукции металлообработки составляет от 35 до 40 % от общего производства продукции [1–3]. В свою очередь, на промышленный сектор приходится более 50 % мирового потребления энергии, из которых на страны, не входящие в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), приходится до 67 %. Использование энергии и ресурсов в производственном секторе составляет порядка 40 % и 25 % мирового потребления соответственно. В последнее время концепция обеспечения устойчивого производства набирает обороты благодаря осознанию колоссального экологического воздействия, оказываемого на окружающую среду посредством значительного использования энергии и ресурсов [1–6]. Сложилось четкое понимание, что устойчивый рост производства возможен только лишь при реализации таких условий изготовления продукции, при которых используются процессы, сводящие к минимуму негативное воздействие на окружающую среду, сохраняющие энергию и природные ресурсы, безопасные для сотрудников, населения и потребителей и являющиеся экономически обоснованными. Следовательно, успех развития того или иного производства в значительной степени зависит от эффективного использования металлообрабатывающих станков.

В связи с этим в стратегически важной и базовой отрасли машиностроения – станкостроении – сформировался кластер гибридных металлообрабатывающих систем, при проектировании и создании которых разработчики придерживаются принципа полифункциональной интеграции [4, 7–18]. Одним из вариантов такого высокотехнологичного интегрального оборудования являются станки, объединяющие несколько различных по природе технологических процессов (рис. 1). Например, это может быть фрезерование или точение с применением лазерного или плазменного нагрева (Laser Assisted Machining (LAM) или Plasma Assisted Machining (PAM)); абразивное шлифование – поверхностная закалка посредством дополнительного источника тепла; точение – закалка с использованием концентрированного источника энергии – ультразвуковая упрочняюще-отделочная обработка; токарная обработка – закалка высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты – алмазное выглаживание и др. [7, 14, 17, 19–70].

Стремление конструкторов к увеличению технологического потенциала станков и обеспечению автономной работы гибридного оборудования в гибком производстве привело к появлению и развитию данного класса оборудования [7–9, 14, 16–21, 32–37, 47]. Промышленное апробирование показало положительные результаты, подтверждающие существенное сокращение производственного цикла изготовления деталей

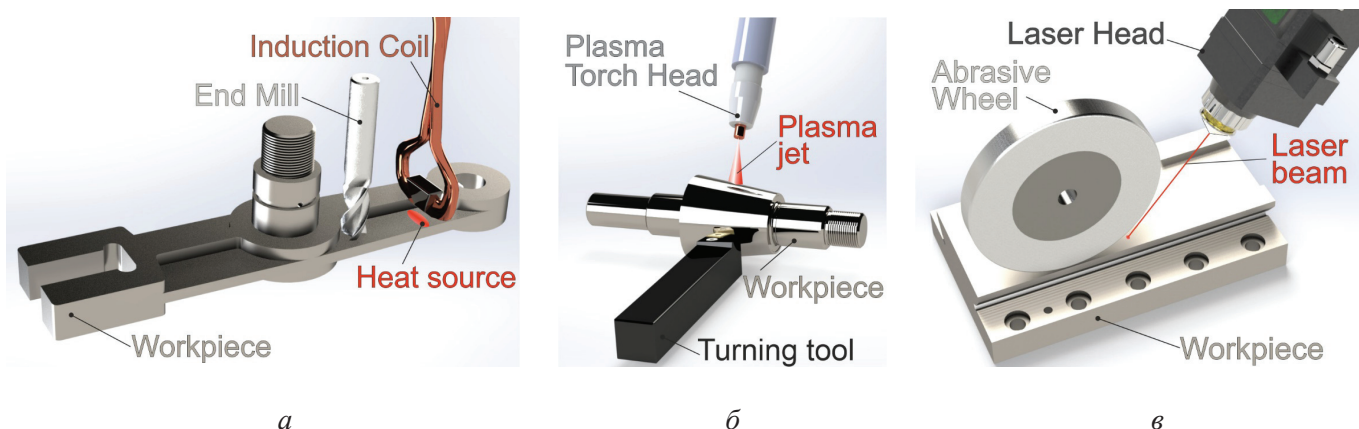


Рис. 1. Разновидности гибридных металлообрабатывающих станков, объединяющих механическую обработку с различными источниками тепла:

а – фрезерование с применением индукционного нагрева; б – точение с применением плазменного нагрева; в – шлифование с применением лазера

Fig. 1. Varieties of hybrid metalworking machines that combine machining with various heat sources: а – Induction Assisted Milling (IAM); б – Plasma Assisted Turning (PAT); в – Laser Assisted Grinding (LAG)

машин и уменьшение ресурсозатрат при использовании таких систем [7, 10, 14, 20–74].

Объектом проведенных исследований является технологический процесс изготовления пуансона листогибочного прессы, включающий в себя следующие операции: механическая обработка – фрезерование и поверхностная закалка – высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (рис. 2). При разработке классического технологического процесса изготовления детали операции поверхностно-термического упрочнения и фрезерования традиционно проводятся на

разном оборудовании и в разных цехах машиностроительного предприятия. В результате этого на термической операции необходимо получить упрочнение глубже, чем задано рабочим чертежом, а затем на финишной механической операции приходится удалять самую эффективную часть поверхностного слоя. Из-за такого подхода наблюдается снижение производительности как на поверхностно-термической, так и на механической операции, а также увеличение энергозатрат на обоих этапах технологического процесса [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–75].

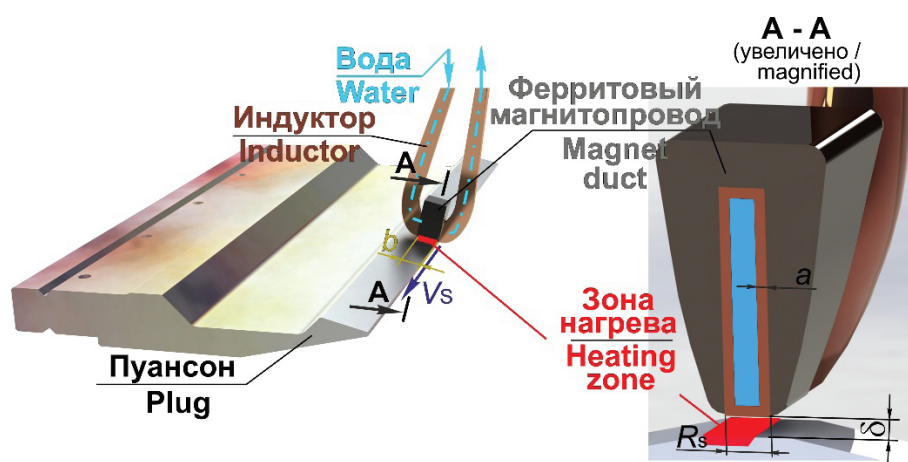


Рис. 2. Схема обработки пуансона при ВЭН ТВЧ

Fig. 2. Pattern of HFC hardening of a punch

Для решения указанной проблемы предлагается объединить две операции на одном металлообрабатывающем станке. С учетом современного развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных установок тиристорного типа [76–81], а также принципов удобного интегрирования в гибридную станочную систему в нашей работе мы рассматриваем использование высокочастотных генераторов типа СВЧ-10 мощностью 10 кВт [7, 14, 61, 82].

Актуальной задачей становится разработка новых методик назначения режимов обработки, которые будут учитывать взаимосвязь между объединяемыми операциями технологического процесса. Эти технологические рекомендации должны обеспечивать получение деталей с заранее заданной точностью и определенными физико-механическими свойствами их рабочих поверхностей [7, 14, 17, 47, 61, 71–75, 83].

Целью работы является разработка методики назначения рациональных режимов закалки ВЭН ТВЧ, обеспечивающих в условиях интегральной обработки повышение производительности и снижение энергозатрат при поверхностно-термическом упрочнении рабочих поверхностей пуансона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Разработать методику структурного анализа, позволяющую проводить эффективные предпроектные исследования в процессе разработки гибридного металлообрабатывающего оборудования. В этой методике должна быть учтена возможность интеграции источника концентрированной энергии в стандартную станочную систему.

2. Осуществить практическое испытание комплекса оборудования, реализующего технологию ВЭН ТВЧ, с целью доказательства эф-

фektivности ее внедрения в производство. В процессе апробации провести оценку эффективности исследуемой технологии в соответствии с заданными критериями.

Методика экспериментального исследования

Исполнительные движения гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС) и необходимое количество их настраиваемых параметров определялись посредством применения структурно-кинематического синтеза механизмов металлорежущих станков [14, 82, 84–87]. Основные положения структурного синтеза и компонетики рассматриваемых систем, приведенные в работах [14, 82, 84–96], использовались для проведения исследований предполагаемого структурного состава и компоновки ГМС, в которой интегрированы поверхностно-термическая обработка и механические операции.

Материалы и методы натурных экспериментов

Для натурных экспериментов был выбран пуансон листогибочного пресса (рис. 3), изготовленный из стали У10А (табл. 1). Состав исходного материала определяли на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Для определения линейных операционных размеров, учитывая требуемую глубину термоупрочненного слоя, использовали теорию размерных цепей и методику, представленную в соответствующих работах [97, 98].

Эксперименты проводились на модернизированном многоцелевом обрабатывающем центре МС 032.06, оснащенный дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10 с рабочей частотой тока 440 кГц, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты.

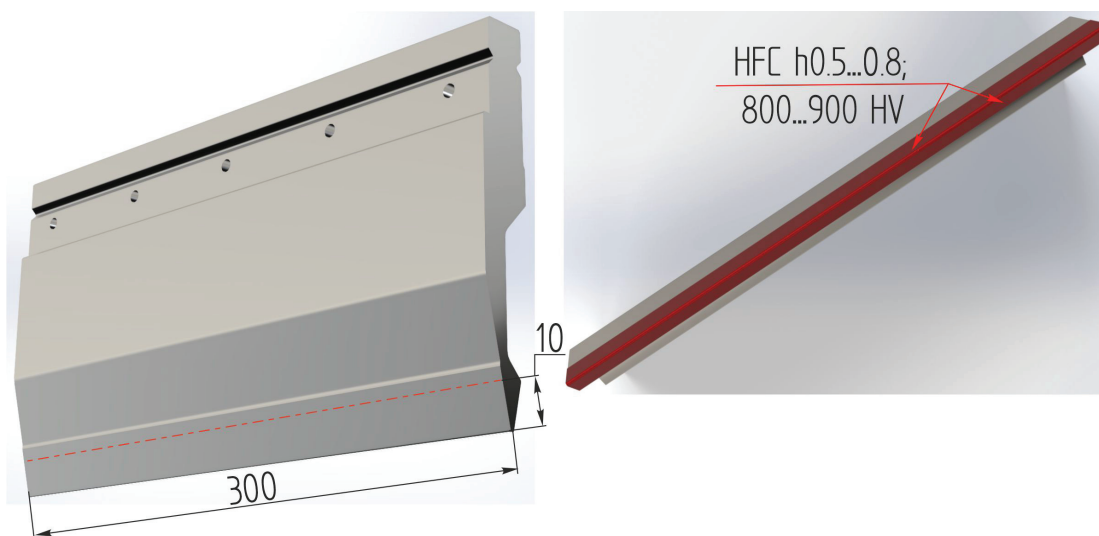


Рис. 3. Пуансон листогибочного пресса

Fig. 3. Press brake plug

Таблица 1

Table 1

Химический состав исходного материала

Chemical compositions of initial material

Сталь / Steel	Массовая доля элемента, % / Mass content of elements, [%]							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
У10А	1,01	0,25	0,21	0,017	0,022	0,18	0,17	0,15

Структурные исследования образцов проводились на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m и на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP, который оснащен энергодисперсионным анализатором INCA X-ACT (Oxford Instruments). Микроструктура образцов выявлялась с использованием 5%-го спиртового раствора азотной кислоты и насыщенного раствора пикриновой кислоты в этиловом спирте с добавлением поверхностно-активных веществ [99].

Микротвердость упрочненного поверхностного слоя деталей оценивали с помощью прибора Wolpert Group 402MVD. Остаточные напряжения измеряли с использованием рентгеновского метода на дифрактометре высокого разрешения ARL X'TRA и механического разрушающего метода – послойного электролитического травления образца [100, 101]. Для выявления дефектов поверхностного слоя использовали визуально-оптический метод с применением микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, капиллярный метод и токовихревой метод с применением вихревого дефектоскопа ВД-70.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований производилась в программных продуктах Statistica, Table Curve 2D и Table Curve 3D.

Результаты и их обсуждение

В процессе разработки интегрального металлообрабатывающего оборудования планируется внедрение метода высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты на гибридном станке во время одного из технологических этапов. Учитывая особенности конструкции индукторов для этого процесса, поверхностный нагрев обрабатываемой поверхности осуществляется локализованными участками, размеры которых определяются шириной активного провода индуктора и длиной ферритового магнитопровода (рис. 2). Для обеспечения поверхностной закалки необходимы согласованные движения заготовки и инструмента, аналогичные тем, которые используются при фрезеровании [7, 14, 17, 47, 82, 87]. Структурно-кинематический анализ показал, что на всех этапах интегральной обработки (предварительное фрезерование, закалка токами высокой частоты и чистовое фрезерование)

требуется аналогичный набор исполнительных движений и настраиваемых параметров.

Последующий синтез обобщенной кинематической структуры разрабатываемой гибридной металлообрабатывающей системы выполнялся на основе пятикоординатного обрабатывающего центра MC 032.06 с CNC-системой управления, предназначенного для высокопроизводительной обработки произвольно расположенных поверхностей деталей, установленных на рабочем столе (рис. 4). При этом методе формулу компоновки можно представить в следующем виде:

$$[CAY0XZ]\{[\hat{D}_h] + [d]\},$$

где A и C – поворотные оси стола; Y – вертикальное перемещение стола с заготовкой; X и Z – линейные перемещения инструмента; $\hat{D}_h$ – вращение шпинделя с режущим инструментом; d – установочное вращательное движение индуктора. Блок D_h , выполняющий главное движение резания при фрезеровании, дополнительно помечен знаком $\wedge$.

После проведения всестороннего анализа требуемой структурной формулы компоновки гибридного оборудования, кинематической структуры станка MC 032.06 и жесткости его базовых узлов были выявлены основные направления модернизации указанной модели металлообрабатывающего оборудования. Проведенный комплекс предпроектных исследований позволил подготовить рабочую документацию для реализации гибридного технологического оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую обработку (рис. 5).

В результате расчетов технических характеристик гибридного металлообрабатывающего оборудования было зафиксировано, что для обеспечения сравнимого с механическими операциями уровня производительности формообразования необходимо осуществлять обработку ВЭН ТВЧ на скоростях порядка $V_s \in [50, 100]$ мм/с. Проведение натурных экспериментов позволило определить диапазон удельных мощностей источника $q_s(h, V_s)$, с которыми требуется производить обработку ВЭН ТВЧ: $q_s \in [1,5; 4,0] 10^8$ Вт/м².

Для подтверждения эффективности внедрения разработанного гибридного оборудования рассмотрим конкретный пример: финишную стадию технологического процесса обработки

пуансона (см. рис. 3). В нашем примере приведены две различные схемы обработки: с использованием стандартной заводской технологии и с применением предлагаемой интегрированной обработки. Анализ представленных данных позво-

лит подтвердить эффективность внедрения разработанного гибридного металлообрабатывающего оборудования и продемонстрировать преимущества, которые оно может принести по сравнению с традиционными методами обработки.

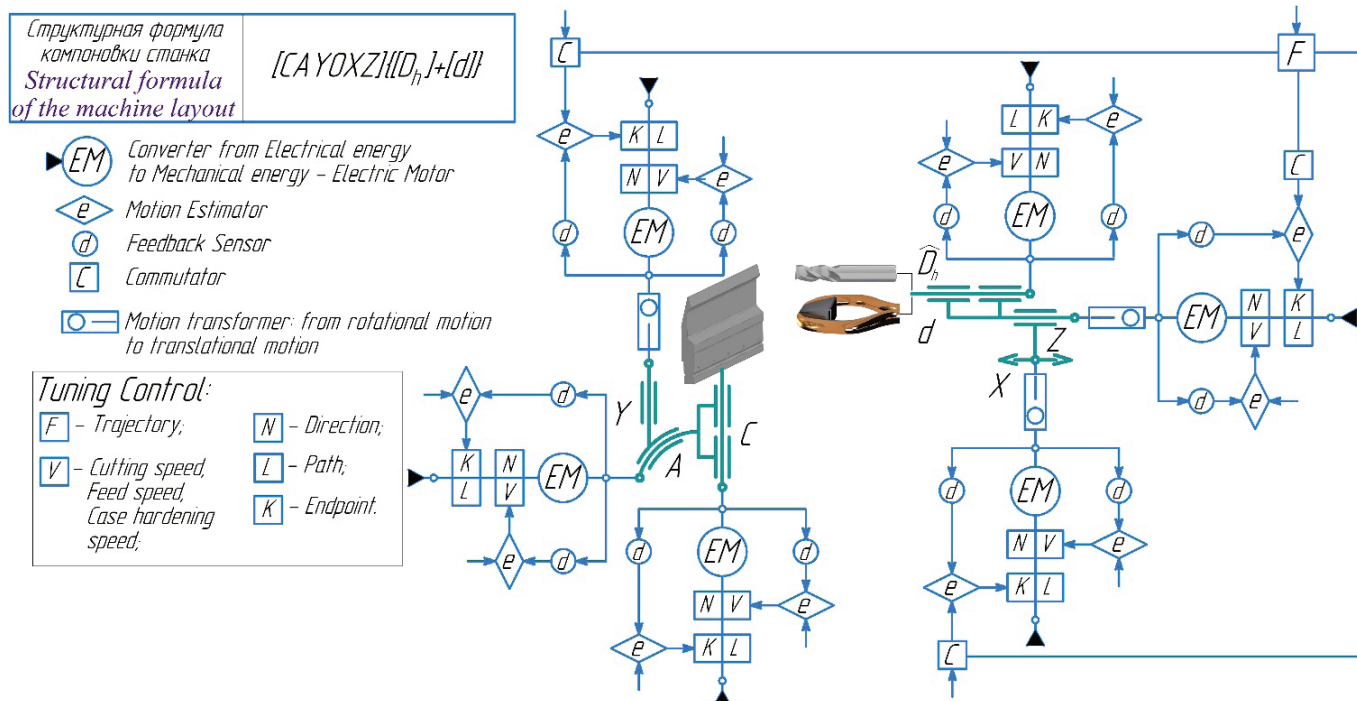


Рис. 4. Структурная схема гибридного металлообрабатывающего станка

Fig. 4. Block schematic diagram of the hybrid metalworking machine

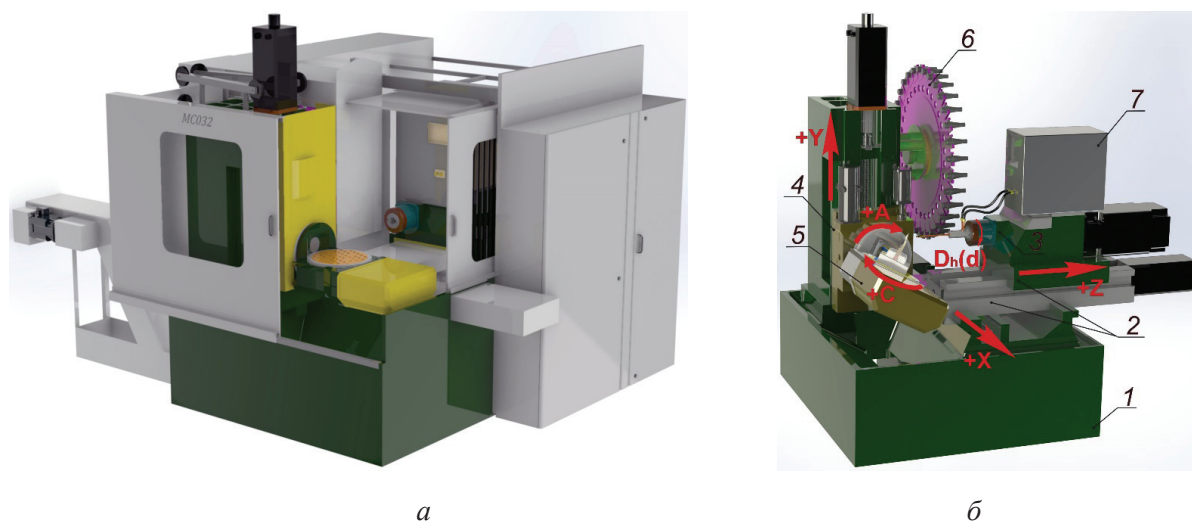


Рис. 5. Гибридный металлообрабатывающий станок:

а – общий вид станка; б – принципиальная компоновка интегрального станочного комплекса: 1 – станина; 2 – крестовый суппорт; 3 – шпиндельный узел; 4 – вертикальные салазки; 5 – поворотный стол; 6 – магазин для инструментов; 7 – сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10

Fig. 5. Hybrid metal-working machine:

а – general view of the machine; б – basic layout of the integral machine tool complex: 1 – machine bed; 2 – dual slides; 3 – spindle assembly; 4 – vertical slide; 5 – turntable; 6 – tool magazine; 7 – microwave thyristor-type generator SHF-10

Согласно заводскому технологическому процессу изготовления пуансона после предварительной механической обработки выполняется операция «поверхностная закалка ТВЧ». В этой операции необходимо учесть технологическую глубину закали, принимая во внимание последующую финишную механическую обработку (шлифование). Технологическая глубина закали в этом случае должна составлять $A_T = 0,84^{+0,1}$ мм [97, 98]. Однако стоит отметить, что согласно данным предприятия примерно 7 % изготовленных деталей подлежат выбраковке из-за наличия прижогов и микротрещин на поверхности, образующихся в процессе операции «шлифование».

Для достижения указанной глубины упрочненного слоя с использованием генератора частотой 440 кГц требуется реализовать поверхностную схему нагрева. В такой схеме удельная мощность и скорость движения источника нагрева будут ниже по сравнению с объемной схемой. Активный провод индуктора имеет ширину $R_S = 4$ мм и длину $b = 15$ мм, что соответствует удельной мощности $q_S = 1,2 \cdot 10^7$ Вт/м² и скорости $V_S = 2$ мм/с.

Для закали детали необходимо обработать два участка общей длиной $300 \times 2 = 600$ мм. Оба участка обрабатываются за два продольных перемещения петлевого индуктора относительно детали. Общая длина хода инструмента (перемещение вдоль оси X) с учетом захода и выхода индуктора при непрерывно-последовательной схеме нагрева составляет $l = (300 + 8 + 4) \times 2 = 624$ мм. При таких параметрах основное время равно $T_o = l / V_d = 312$ с. В соответствии с общемашиностроительными нормами на термическую обработку на установках ТВЧ вспомогательное время для базирования детали типа «плоскость» составляет $T_{всп} = 15$ с. Таким образом, штучная производительность равна

$$P_{шт} = \frac{1}{T_o + T_{всп}} = \frac{1}{312 + 15} = 0,003 \text{ с}^{-1},$$

а энергозатраты составляют

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{q_S b R_S l}{V_d} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 10^7 \cdot 0,015 \cdot 0,004 \cdot 0,624}{0,002} \approx \\ &\approx 0,062 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Финишная стадия технологического процесса изготовления детали при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования осуществлялась на модернизированном многоцелевом обрабатывающем центре MC 032.06 и состояла из трех переходов: предварительная (черновая) и получистовая механическая обработка, поверхностная закалка ВЭН ТВЧ, чистовое фрезерование. Станочная система была дооснащена дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10 с рабочей частотой тока 440 кГц. Для измерения и контроля рабочей частоты индукционного нагревателя использовался цифровой осциллограф Hantek DSO 1000S Series.

Исходя из габаритных размеров изделия $25 \times 160 \times 300$ мм из материала У10А, была взята заготовка в форме листа $30 \times 170 \times 310$ мм. Для базирования в станке использовалась пара специальных самоцентрирующихся тисов с сечением губок 40×100 мм. Первым этапом изготовления было формообразование присоединительного основания пуансона, которое включало в себя черновую и чистовую обработку торцевыми и концевыми фрезами с СМП из твердого сплава. Исходя из технических характеристик станка и обрабатываемого материала был подобран инструмент и рассчитаны режимы резания. Для черновых операций использовалась торцевая фреза IE21-90.11A16.040.05 диаметром 40 мм с пластинами APKT113508R-GL IA6330, предназначенными для фрезерования углеродистой и нержавеющей стали и твердых материалов. Режимы резания: $V_C = 200$ м/мин; $ap = 5$ мм; $ae = 30$ мм; $V_f = 800$ мм/мин. Этим же инструментом производилась чистовая доводка плоскости на следующих режимах: $V_C = 350$ м/мин; $ap = 0,15$ мм; $ae = 30$ мм; $V_f = 500$ мм/мин. Для формирования присоединительных пазов использовалась монолитная твердосплавная фреза диаметром 4 мм с радиусом кромки 0,2 мм и шаровая фреза диаметром 2 мм на следующих режимах: $V_C = 50$ м/мин; $ap = 0,5$ мм; $ae = 4$ мм; $V_f = 500$ мм/мин.

В процессе закали использовался индуктор петлевого типа, оснащенный ферритом марки N87 (рис. 2) [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–73, 75, 82–83, 87]. Индуктор установлен в переходную оправку из стеклонаполненного пластика ZX-

324 GF30 РЕЕК, способную работать в условиях повышенных температур, и надежно зафиксирован в инструментальном патроне с цанговым зажимом (рис. 6). Исследования проводились при использовании интенсивного водяного циркуляционного охлаждения индуктора (см. рис. 2).

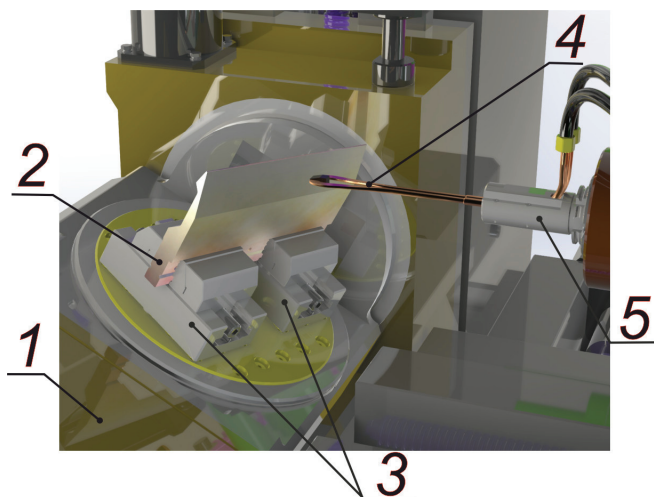


Рис. 6. Зона обработки при ВЭН ТВЧ:

1 – поворотный стол; 2 – заготовка; 3 – самоцентрирующиеся тиски; 4 – петлевой индуктор; 5 – переходная оправка

Fig. 6. Processing area with high-energy heating by high-frequency currents:

1 – turntable; 2 – workpiece; 3 – self-centering chuck; 4 – loop inductor; 5 – adapter mandrel

Чистовое фрезерование рабочего профиля производилось на следующих режимах: $V_C = 370$ м/мин; $ap = 0,05$ мм; $ae = 20$ мм; $V_f = 250$ мм/мин. Во время механической обработки использовалась универсальная смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) TECHCOOL 1000, содержащая минеральные масла.

В процессе интегральной обработки заготовки, когда нивелируются ее переуставы между механическими операциями и поверхностной термической обработкой, технологическая глубина закалки на переходе «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ» составляет $A_T = 0,52^{+0.28}$ мм (припуск на окончательную обработку $z_{\min} = 0$). Отсутствие дополнительного установа, а также наличие того факта, что предварительная обработка выполняется на незакаленном материале, приводит к тому, что фрезерование осуществляется в более интенсивном режиме, чем при использовании стандартной технологии. Более того, применение гибридной технологии позво-

ляет интенсифицировать процесс резания заготовки при механической обработке за счет дополнительного подогрева концентрированным источником энергии. Предварительный подогрев изделия высокочастотными токами перед применением режущего инструмента снижает сопротивление при обработке и делает заготовку более податливой для формообразования. Таким образом, достигается дополнительный эффект, позволяющий усилить режимные параметры при предварительном (черновом) фрезеровании. При этом последующим переходом «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ» за счет нагрева углеродистой инструментальной стали У10А под закалку станет возможным нивелировать опасный уровень напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки на окончательное состояние материала.

Для определения наиболее эффективных режимов поверхностной закалки в рамках использования гибридной обработки была установлена взаимосвязь между глубиной упрочнения и технологическими параметрами обработки для данной марки стали:

$$h(q_S, V_S) = a + bV_S + cq_S + dV_S^2 + eq_S^2 + fV_Sq_S + gV_S^3 + xq_S^3 + iV_Sq_S^2 + jV_S^2q_S, \quad (1)$$

где значения коэффициентов для стали У10А: $a = 0,906184$; $b = -12,343186$; $c = 1,851541 \cdot 10^{-9}$; $d = 24,621030$; $e = 4,103625 \cdot 10^{-18}$; $f = -1,571684 \times 10^{-8}$; $g = -66,067377$; $x = -4,851607 \cdot 10^{-28}$; $i = -2,040626 \cdot 10^{-17}$; $j = 6,052463 \cdot 10^{-8}$.

Результаты исследований приведены на рис. 7. Обработка экспериментальных данных была выполнена с помощью программных продуктов STATISTICA 6.0 и Table Curve 3D v 4.0. Важно отметить, что максимальная погрешность не превышает 5 %, что говорит о надежности и точности результатов. Это подтверждает достоверность исследования и позволяет принять его результаты во внимание при выработке решений.

При использовании ВЭН ТВЧ изменение геометрических параметров источника в процессе изготовления нового индуктора является сложным и затратным процессом. В связи с этим удельная мощность источника нагрева и скорость его перемещения были выбраны в качестве переменных параметров. При применении

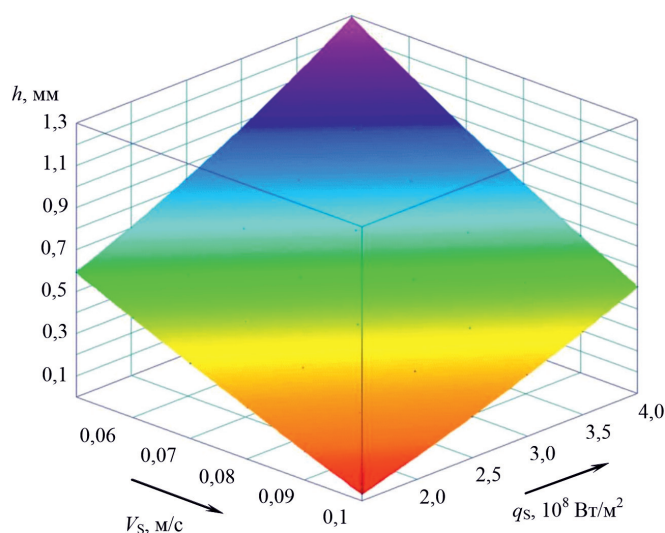


Рис. 7. Функциональная зависимость $h(q_s, V_s)$ для стали У10А

Fig. 7. Functional dependence $h(q_s, V_s)$ for U10A steel

индукционного нагрева обычно сначала определяется размер источника, а затем два других технологических параметра. Однако результаты математических и экспериментальных исследований [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–73, 75, 82–83, 87] показали, что полученные диапазоны режимов упрочнения не гарантируют формирования закаленного слоя без появления закалочных трещин. Основной причиной появления таких микротрещин является внутреннее напряженное состояние материала.

При поверхностной закалке особое внимание уделяется глубине упрочнения, так как это является основным параметром в процессе. Для достижения желаемого уровня твердости необходимо выбрать оптимальную марку стали. При этом воздействие на величину и распределение остаточных напряжений возможно только путем изменения размера переходной зоны.

Принимая во внимание факт, что месторасположение максимальных растягивающих напряжений является очагом разрушения детали в процессе эксплуатации, целесообразно переместить опасную зону вглубь от поверхности изделия. При этом наибольшая глубина залегания достигается, если величина переходного слоя максимальна. Однако необходимо найти равновесие, поскольку при увеличении глубины залегания также уменьшается уровень сжимающих напряжений на поверхности. Исследования показали, что оптимальный размер переходного слоя должен составлять примерно 25–33 % от

глубины упрочненного слоя. При соблюдении этого требования достигается баланс между перемещением напряжений в глубокие слои материала и снижением сжимающих напряжений на поверхности, не превышающим 6–10 %. Особенно важно обеспечить большую величину переходного слоя при закалке сталей с высоким содержанием углерода. Это позволяет эффективно контролировать механические свойства и устойчивость деталей к разрушению [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–73, 75, 82–83, 87, 102].

В процессе выбора режимов поверхностной закалки деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, используется дополнительный критерий – относительная величина переходной зоны, обозначаемая как $\Psi(q_s, V_s)$. Этот критерий определяется как отношение величины переходной зоны к глубине закаленного слоя.

Путем анализа экспериментальных данных была установлена соответствующая функциональная зависимость $\Psi_{U10}(q_s, V_s)$ (рис. 8), применимая к исследуемому материалу и диапазону режимов обработки:

$$\Psi_{U10}(q_s, V_s) = k + lV_s + mq_s + nV_s^2 + oq_s^2 + pV_sq_s + rV_s^3 + sq_s^3 + tV_sq_s^2 + uV_s^2q_s, \quad (2)$$

где $0,25 \leq \Psi_{U10}(q_s, V_s) \leq 0,33$. Значения коэффициентов функциональной зависимости для стали марки У10А: $k = 0,55499986$; $l = 6,376$; $m = -3,0969982 \cdot 10^{-9}$; $n = 2,1133193 \cdot 10^{-6}$; $o = -6,697454 \cdot 10^{-24}$; $p = -9,444857 \cdot 10^{-16}$; $r = -1,1120113 \cdot 10^{-5}$; $s = 8,2498316 \cdot 10^{-33}$; $t = 1,5500134 \cdot 10^{-24}$; $u = 1,3319075 \cdot 10^{-15}$.

Определение удельной мощности и скорости перемещения источника при поверхностной закалке осуществляется путем решения системы уравнений при заданных значениях глубины закалки и относительной величины переходной зоны:

$$\begin{cases} h_{U10}(q_s, V_s); \\ \Psi_{U10}(q_s, V_s). \end{cases}$$

Графическое решение этой задачи представлено на рис. 9. Следует отметить, что полученный диапазон режимов обработки значительно меньше по сравнению с интервалом режимов

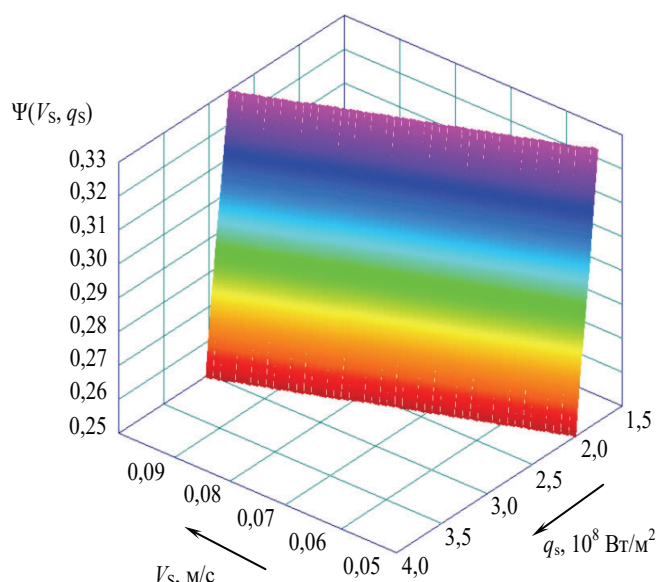


Рис. 8. Функциональная зависимость $\Psi(q_s, V_s)$ для стали У10А

Fig. 8. Functional dependence $\Psi(q_s, V_s)$ for U10A steel

для достижения только заданной глубины упрочненного слоя.

Для достижения в процессе поверхностной закалки ВЭН ТВЧ требуемой глубины упрочненного слоя $h = 0,52$ мм необходимо выбрать режимные параметры в диапазоне, ограниченном

точками А и В на кривой (рис. 9). Эти параметры включают в себя удельную мощность q_s , которая будет находиться в диапазоне от $2,09 \cdot 10^8$ до $2,49 \cdot 10^8$ Вт/м², а скорость перемещения источника V_s будет составлять от 66 до 73 мм/с. Указанные режимы обработки гарантируют достижение требуемой глубины закалки и оптимальную величину переходной зоны.

Поскольку закалка ВЭН ТВЧ выполняется за одну установку заготовки, то вспомогательное время равно 0 с. Расчет производительности и энергозатрат на переходе «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ» выполняется с использованием следующих формул:

$$\Pi_{\text{шт}} = \frac{V_s}{L}; \quad \Theta = \frac{q_s b R_s}{\Pi_{\text{шт}}} = \frac{q_s b R_s L}{V_s},$$

где $L = 614$ мм (см. рис. 3); $b = 10$ мм (см. рис. 2).

Табл. 2 содержит результаты расчета энергозатрат и производительности для всех сочетаний режимных параметров при термоупрочнении детали.

В результате анализа можно сделать вывод о том, что применение интегральной обработки позволяет значительно увеличить производительность поверхностной закалки ВЭН ТВЧ по сравнению с существующей технологией на

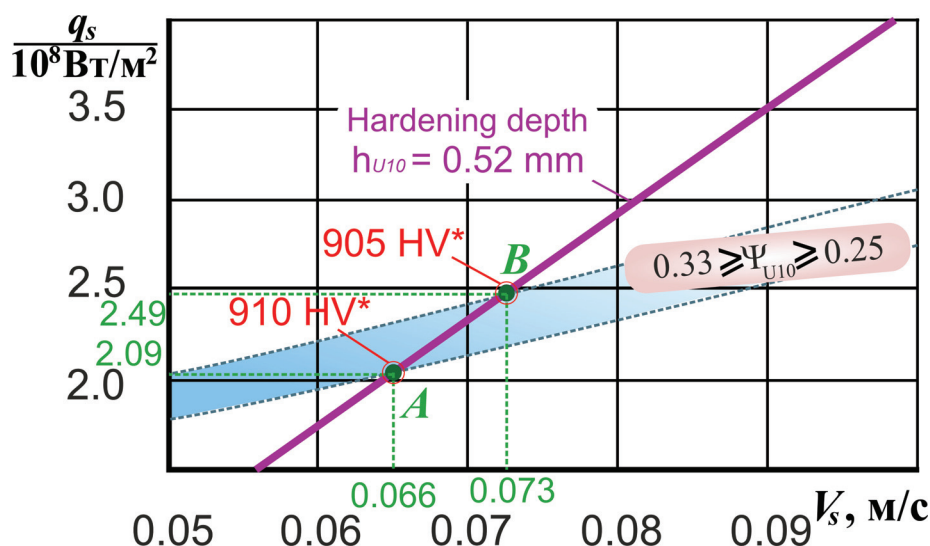


Рис. 9. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали У10А на глубину 0,52 мм.

* Уровень микротвердости поверхностного слоя детали, достигнутый после перехода «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ»

Fig. 9. The dependence of specific power of the source on its speed while HEH HFC hardening steel U10 to a depth of $h = 0.52$ mm.

* The level of microhardness of the surface layer of the part, achieved after the operation "Surface hardening by HEH HFC"

**Результаты расчета производительности и энергозатрат при интегрированной обработке
поверхностной заалки с использованием ВЭН ТВЧ**

**Calculation results of the efficiency and energy consumption in the integrated processing of surface HEN
HFC hardening**

Сталь, режим		Скорость V_s , м/с	Удельная мощность q_s , 10^8 Вт/м ²	Производительность, с ⁻¹	Энергозатраты, кВт · ч
У10А	<i>A</i>	0,066	2,09	0,108	0,011
	<i>B</i>	0,073	2,49	0,119	0,012

предприятия до 36–40 раз. Кроме того, энергозатраты сокращаются почти в шесть раз.

Результаты оптической микроскопии, измерений микротвердости и остаточных напряже-

ний представлены в виде графической и числовой информации на рис. 10. Эти результаты становятся основой для более глубокого анализа и интерпретации полученных данных.

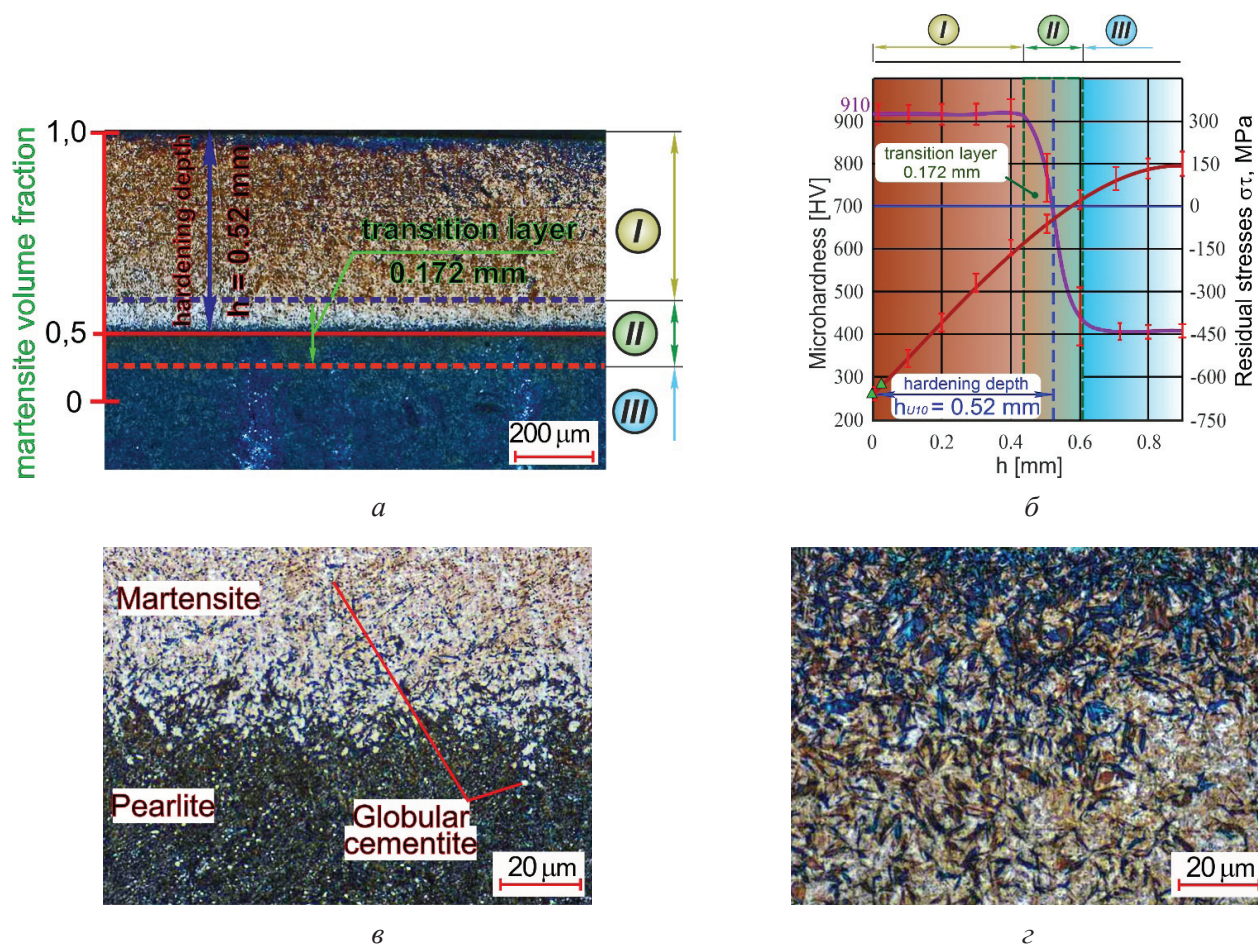


Рис. 10. Результаты экспериментов для деталей, изготовленных из стали У10А:

a – оптическая микроскопия; *б* – распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое (▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновским методом определения); *в* – микроструктура основного металла и переходной зоны; *г* – микроструктура упрочненного слоя

Fig. 10. Experimental results for parts made of U10A steel:

a – optical microscopy; *б* – the distribution of microhardness and residual stresses in the surface layer (▲ – residual stresses obtained by X-ray determination); *в* – microstructure of base metal and transition zone; *г* – microstructure of the hardened layer

Изучая график распределения микротвердости поверхностного слоя (рис. 10, а, б), можно выделить три характерные области. Первая область, обозначенная как зона I, характеризуется стабильным средним значением микротвердости. Вторая область, или зона II, является переходной зоной. Наконец, третья область, или зона III, не претерпевает структурно-фазовых изменений. Глубину закаленного слоя определяют как расстояние от поверхности до области, содержащей 50 % мартенсита. Переходный слой представляет собой область между поверхностным слоем закаленного металла с постоянным средним значением микротвердости и зоной материала, не подвергшегося структурно-фазовым превращениям.

Основной металл представляет собой пластинчатый перлит (рис. 10, в). Кроме того, в основном металле наблюдается глобулярный цементит размерами от 1 до 5 мкм. Переходная зона, величина которой при данных режимах обработки составляет 0,172 мм (рис. 10, а, б), состоит из мартенсита (светлый), перлита (темный) и глобулярного цементита (рис. 10, в). Наличие перлита и глобулей цементита говорит о том, что температуры нагрева этого участка не превышали температуры A_{c3} и время выдержки при этой температуре было незначительно. В упрочненном слое наблюдается мартенсит с резко протравленными пластинами и остаточный аустенит (рис. 10, з). По мере удаления от основного металла количество глобулярного цементита уменьшается.

Упрочненный слой исследуемой марки стали, полученный при ВЭН ТВЧ на глубине закалки 0,52 мм, обладает микротвердостью 910 HV. Кроме того, максимальное значение остаточных напряжений сжатия на рабочей поверхности пуансона примерно равно $\sigma_{C \max} \approx -700$ МПа.

Закключение

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации, которые направлены на модернизацию многоцелевого пятикоординатного обрабатывающего центра MC 032.06. Их исполнение позволит осуществить высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) на стандартной станочной системе и сформировать наукоемкое технологическое

оборудование с расширенными функциональными возможностями. Было экспериментально подтверждено, что внедрение предложенного гибридного станка и применение разработанных рекомендаций для установления рациональных режимов ВЭН ТВЧ в процессе интегральной обработки деталей типа «пуансон» может значительно увеличить производительность поверхностной закалки – в 36–40 раз по сравнению с используемой заводской технологией. Одновременно с этим энергозатраты сокращаются в шесть раз. Выполнение представленной работы позволило получить информацию, которая может быть использована для решения актуальной проблемы в сфере машиностроения. Эта задача связана с обеспечением высокого качества продукции, сокращением времени производственного цикла, минимизацией себестоимости выпускаемых изделий и созданием новых поверхностных характеристик обрабатываемых деталей. Таким образом, результаты работы предоставляют ценные рекомендации и подходы для решения всех этих аспектов и улучшения процесса производства в области машиностроения.

Список литературы

1. Optimization of machining parameters for green manufacturing / Y. Anand, A. Gupta, A. Abrol, Ayush Gupta, V. Kumar, S.K. Tyagi, S. Anand // *Cogent Engineering*. – 2016. – Vol. 3, iss. 1. – P. 1153292. – DOI: 10.1080/23311916.2016.1153292.
2. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools / J. Lv, R. Tang, Sh. Jia, Y. Liu // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 112, pt. 5. – P. 3864–3874. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
3. Martino J.P. Technological forecasting – An overview // *Management Science*. – 1980. – Vol. 26, N 1. – P. 28–33.
4. Рыжикова Т.Н., Боровский В.Г. Исследование стратегических перспектив модернизации станкостроения // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2017. – Т. 16, № 5 (464). – С. 835–850. – DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
5. Ghani J.A., Rizal M., Haron C.H.C. Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700 // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – Vol. 85. – P. 289–292. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.029.
6. Fernando W.L.R., Karunathilake H.P., Gamage J.R. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A

review // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 3. – P. 100100. – DOI: 10.1016/j.clet.2021.100100.

7. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатывающих технологий, интегрируемых на единой станочной базе // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 45–71. – DOI: 10.17212/19946309202123.34571.

8. Макаров В.М., Лукина С.В. Уникальная синергия гибридных станков // *Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2016. – № 8. – С. 18–25.

9. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // *Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

11. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan / M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura, eds. – London: Springer, 2008. – 556 p. – ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

12. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

13. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multi-arms machine tool // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

14. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-63092019-21.2-62-83.

15. Brecher C., Özdemir D. Integrative production technology: theory and applications. – [S. l.]: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – ISBN 978-3-319-47452-6. – DOI: 10.1007/9783-319-47452-6.

16. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

17. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной

закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 9785-7782-3988-3.

18. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

19. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50, iss. 8. – P. 663–680. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

20. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials / K. You, G. Yan, X. Luo, M.D. Gilchrist, F. Fang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 677–692. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.

21. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

22. Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

23. Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T. Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy // *Optical and Quantum Electronics*. – 1995. – Vol. 27, iss. 12. – P. 1149–1164. – DOI: 10.1007/BF00326472.

24. Madhavulu G., Ahmed B. Hot Machining Process for improved metal removal rates in turning operations // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1994. – Vol. 44. – P. 199–206. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.

25. Laser-assisted grinding of silicon nitride ceramics: Micro-groove preparation and removal mechanism / C. Wu, T. Zhang, W. Guo, X. Meng, Z. Ding, S.Y. Liang // *Ceramics International*. – 2022. – Vol. 48, iss. 21. – P. 32366–32379. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.180.

26. Rao T.B. Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 20. – P. 1020–1034. – DOI: 10.1080/14484846.2020.1769458.

27. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium / M. Olsson, V. Akujärvi, J.-E. Ståhl, V. Bushlya // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol. 97. – P. 105520. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.

28. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // South African Journal of Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.
29. Kim S.-G., Lee C.-M., Kim D.-H. Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 3016–3027. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.130.
30. Lee Y.-H., Lee C.-M. A study on optimal machining conditions and energy efficiency in plasma assisted machining of Ti-6Al-4V // Materials. – 2019. – Vol. 12. – P. 2590. – DOI: 10.3390/ma12162590.
31. Influence of surface integrity induced by multiple machining processes upon the fatigue performance of a nickel based superalloy / Z. Liao, D. Xu, G.G. Luna, D. Axinte, G. Augustinavicius, J.A. Sarasua, A. Wretland // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 298. – P. 117313. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117313.
32. Laser assisted milling device: A review / C.M. Lee, D.H. Kim, J.T. Baek, E.-J. Kim // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2016. – Vol. 3, iss. 2. – P. 199–208. – DOI: 10.1007/s40684-016-0027-1.
33. Wiedenmann R., Zaeh M.F. Laser-assisted milling – Process modeling and experimental validation // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2015. – Vol. 8. – P. 70–77. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.08.003.
34. Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys / L.N. López de Lacalle, J.A. Sánchez, A. Lamikiz, A. Celaya // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. – Vol. 126, iss. 2. – P. 274–285. – DOI: 10.1115/1.1644548.
35. Baek J.-T., Woo W.-S., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of induction and laser-induction assisted machining of AISI 1045 steel and Inconel 718 // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 34, pt. A. – P. 513–522. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.030.
36. High throughput hybrid laser assisted machining of sintered reaction bonded silicon nitride / G. Guerrini, A.H.A. Lutey, S.N. Melkote, A. Fortunato // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 252. – P. 628–635. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.019.
37. A review of low-temperature plasma-assisted machining: from mechanism to application / J. Liu, Y. Li, Y. Chen, Y. Zhou, S. Wang, Z. Yuan, Zh. Jin, X. Liu // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 18, iss. 1. – P. 18. – DOI: 10.1007/s11465-022-0734-y.
38. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2006. – Vol. 220, iss. 12. – P. 2055–2067. – DOI: 10.1243/09544054JEM562.
39. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718 / J. Widłaszewski, M. Nowak, Z. Nowak, P. Kurp // Physical Sciences Forum. – 2022. – Vol. 4, iss. 1. – P. 26. – DOI: 10.3390/psf2022004026.
40. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium // Advances Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10, iss. 6. – P. 565–572. – DOI: 10.1002/adem.200700349.
41. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials // Procedia Manufacturing. – 2016. – Vol. 5. – P. 1337–1347. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.
42. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of Inconel 718 using Nd:YAG laser source // Journal of Advanced Research. – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P. 407–423. – DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.
43. Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel // Wear. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 518–530. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.
44. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V) / S. Ul Hasan, S. Ali, S.H.I. Jaffery, E. Ud Din, A. Mubashir, M. Khan // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 21. – P. 4398–4408. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.
45. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, iss. 3. – P. 601–613. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.
46. Laser assisted machining: a state of art review / Gurabvaiah Punugupati, Kishore Kumar Kandi, P.S.C. Bose, C.S.P. Rao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 149. – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.
47. Скиба В.Ю., Иванцовский 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.
48. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
49. Salonitis K., Chondros T., Chrysosouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process //



The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.

50. *Ding H.T., Shin Y.C.* Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, iss. 1. – P. 106–114. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

51. *Jeon Y., Lee C.M.* Current research trend on laser assisted machining // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – Vol. 13, iss. 2. – P. 311–317. – DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

52. *Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M.* A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 748–753. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.

53. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining / J. Kim, L. Zani, A. Abdul-Kadir, A. Roy, K.P. Baxevanakis, L.C.R. Jones, V.V. Silberschmidt // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 86. – P. 109–125. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.

54. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling / B. Lv, B. Lin, Z. Cao, W. Liu, G. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 89. – P. 371–383. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.

55. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling / J. Witte, D. Huebler, D. Schroepfer, A. Boerner, T. Kannengiesser // Wear. – 2023. – Vol. 522. – P. 204722. – DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.

56. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes / M. Xu, R. Wei, C. Li, T.J. Ko // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 85. – P. 1116–1132. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.

57. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel / P. Dumitrescu, P. Koshy, J. Stenekes, M.A. Elbestawi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2016. – Vol. 46, iss. 15. – P. 2009–2016. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.

58. *Kim E.-J., Lee C.-M.* Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718 // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 411–420. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.

59. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic / Z. Ma, Z. Wang, X. Wang, T. Yu // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, iss. 1. – P. 921–929. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.

60. *Choi Y.H., Lee C.M.* A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 34. – P. 463–476. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.

61. *Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V.* Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions // Metals. – 2021. – Vol. 11, iss. 9. – P. 1354. – DOI: 10.3390/met11091354.

62. *Kim E.J., Lee C.M.* A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718 // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 233. – DOI: 10.3390/ma12020233.

63. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy / D. Xu, Z. Liao, D. Axinte, J.A. Sarasua, R. M'Saoubi, A. Wretland // Materials & Design. – 2020. – Vol. 194. – P. 108851. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.

64. *Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M.* A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 57. – P. 499–508. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.013.

65. *Ha J.-H., Lee C.-M.* A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 7. – P. 1032. – DOI: 10.3390/ma12071032.

66. *Woo W.S., Lee C.M.* A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2018. – Vol. 5, iss. 5. – P. 593–604. – DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.

67. *Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R.* A thermal simulation model for laser-assisted milling // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – P. 353–362. – DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.

68. Laser-assisted milling of advanced materials / C. Brecher, M. Emonts, C.-J. Rosen, J.-P. Hermani // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 599–606. – DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.

69. *Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P.* Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – A comprehensive review // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 1626–1636. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.

70. *Kim I.-W., Lee C.-M.* A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 100. – P. 636–645. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.

71. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents

and abrasive grinding / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhrushev, K.A. Parts, G.O. Cha // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022038. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.

72. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 25. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

73. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин, при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

74. Иванцовский В.В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Новосибирск, 2012. – 425 с.

75. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Эффективность объединения операций поверхностной закалки и шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 15–21.

76. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 115. – P. 104632. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.

77. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening / V. Javaheri, O. Haiko, S. Sadeghpour, K. Valtonen, J. Kömi, D. Porter // Wear. – 2021. – Vol. 476. – P. 203678. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.

78. Hybrid modeling of induction hardening processes / M.Z. Asadzadeh, P. Raninger, P. Prevedel, W. Ecker, M. Mücke // Applications in Engineering Science. – 2021. – Vol. 5. – P. 100030. – DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.

79. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder / M. Areitioaurtena, U. Segurajauregi, I. Urresti, M. Fisk, E. Ukar // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 545–550. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.

80. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications // Engineering

Science and Technology. – 2021. – DOI: 10.1016/j.jestech.2021.05.010.

81. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator / F. Li, X. Li, T. Wang, Y.(K.) Rong, S.Y. Liang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2020. – Vol. 172. – P. 105393. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.

82. Гибридное технологическое оборудование: к вопросу рационального выбора объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии / В.Ю. Скиба, Е.А. Зверев, П.Ю. Скиба, А.Д. Черников, А.С. Попков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 45–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67.

83. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н. Методика назначения режимов обработки при совмещении операций абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4 (53). – С. 19–25.

84. Казанцев М.Е. Построение структурных схем станков и настройки исполнительных движений. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – 54 с.

85. Птицын С.В., Левицкий Л.В. Структурный анализ и синтез кинематики металлорежущих станков. – Киев: УМК ВО, 1989. – 70 с.

86. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 408 с.

87. Повышение эффективности проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую операции: отчет о научно-исследовательской работе по проекту № 9.11829.2018/11.12 / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцовский, О.В. Нос, Е.А. Зверев, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев, Ю.В. Ванаг, К.А. Титова, Г.О. Ча, П.Ю. Скиба. – № ГР АААА-А18-118062290029-8. – Новосибирск, 2018. – 197 с.

88. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: основы компонентики. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

89. Ивахненко А.Г. Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1998. – 244 с.

90. Ивахненко А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.

91. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – II – Investigation of



basic structure / M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 87–93. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

92. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – I – Analysis of requirements and specifications / M. Nakaminami, T. Tokuma, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 78–86. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

93. Introduction to precision machine design and error assessment / ed. by S. Mekid. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 302 p. – ISBN 0849378869. – ISBN 978-0849378867. – (Mechanical and Aerospace Engineering Series).

94. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.

95. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2012. – 365 с.

96. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.Y. Erenkov, E.O. Ivakhnenko, A.V. Oleinik // Russian

Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, N 10. – P. 901–905. – DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

97. Балакишин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 560 с.

98. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

99. ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and microstructures / ed. by G.F. Vander Voort. – Materials Park, Ohio, USA: ASM International Publ., 2004. – 1184 p. – ISBN 978-0-87170-706-2.

100. Totten G.E., Howes M., Inoue T. Handbook of residual stress and deformation of steel. – Materials Park, Ohio, USA: ASM International Publ., 2002. – 499 p. – ISBN 978-0-87170-729-1.

101. Springer handbook of experimental solid mechanics / W.N. Sharpe, ed. – Leipzig; New York: Springer Science and Business Media, 2008. – 1098 p. – ISBN 978-0-387-26883-5.

102. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушкин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Rationalization of modes of HFC hardening of working surfaces of a plug in the conditions of hybrid processing

Vadim Skeebe^{a, *}, Nikita Vakhrushev^{1, b}, Kristina Titova^{1, c}, Aleksey Chernikov^{2, 1, d}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² LLC "GLK-Industrial Technologies", 177 Bolshevistskaya st., shop 16, Novosibirsk, 630083, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2708-3171>, krispars@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>, aleksey.chernikov.97@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 June 2023

Revised: 14 July 2023

Accepted: 27 July 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Hybrid equipment

Multipoint machining

High energy heating

Cutting

Induction hardening

Funding

This research was funded by Russian Science Foundation project N 23-29-00945, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00945/>.

Acknowledgements

Researches were conducted at core facility of NSTU "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. The development of a cluster of hybrid metalworking systems in the machine tool industry is associated with a number of positive consequences. First, such systems help reduce production costs by optimizing the use of resources and energy. This is especially true in the face of increased competition and a trend towards savings. Secondly, hybrid systems enable the production of quality products with increased efficiency. By integrating various functions in one process equipment, metalworking processes become more efficient and precise. This reduces the amount of defective products and improves the quality of the final ones. In addition, hybrid metalworking systems have autonomous functionality, which is especially important in flexible engineering production, where rapid changeover and adaptation to various production tasks is required. Thus, hybrid metalworking systems represent an important step in the development of modern mechanical engineering, helping to reduce costs, increase efficiency and ensure high product quality. *The purpose of this work* is to increase efficiency and reduce energy consumption during surface-thermal hardening of machine parts through the use of concentrated energy sources under integral processing conditions. **Theory and Methods.** To achieve this purpose, studies were carried out on the possible structural composition and layout of hybrid equipment integrating mechanical and surface-thermal processes. When developing the theory and methods, the main provisions of the structural synthesis and components of metalworking systems were taken into account. Theoretical research is based on the application of system analysis, geometric theory of surface formation and design of metalworking machines. The experiments were carried out on a modernized multi-purpose machining center *MS 032.06*, equipped with an additional energy source, which was a microwave thyristor-type generator *SHF-10* with an operating frequency of 440 kHz, which implements high-energy heating by high-frequency currents. Structural studies were carried out using optical and scanning microscopy. The stress-strain state of the surface layer of the part was evaluated by mechanical and X-ray methods for determining residual stresses. The microhardness of the hardened surface layer of the parts was evaluated on a *Wolpert Group 402MVD* instrument. **Results and discussion.** An original method for conducting structural-kinematic analysis for pre-project studies of hybrid metalworking equipment is presented. Methodological recommendations were developed for the modernization of metal-cutting machine tools, allowing high-energy heating with high-frequency currents (*HEH HFC*) on a standard machine tool system and creating high-tech technological equipment with enhanced functionality. It has been experimentally confirmed that the introduction of the proposed hybrid machine into production in combination with recommendations for the appointment of high-frequency electric power units for integral processing of punch-type parts allows increasing the productivity of surface hardening by 36–40 times and reducing energy costs by 6 times.

For citation: Skeebe V.Yu., Vakhrushev N.V., Titova K.A., Chernikov A.D. Rationalization of modes of HFC hardening of working surfaces of a plug in the conditions of hybrid processing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 63–86. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-63-86. (In Russian).

* Corresponding author

Skeebe Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel: +7 (383) 346-17-79, e-mail: skeebe_vadim@mail.ru

References

1. Anand Y., Gupta A., Abrol A., Gupta Ayush, Kumar V., Tyagi S.K., Anand S. Optimization of machining parameters for green manufacturing. *Cogent Engineering*, 2016, vol. 3, iss. 1, p. 1153292. DOI: 10.1080/23311916.2016.1153292.
2. Lv J., Tang R., Jia Sh., Liu Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, pt. 5, pp. 3864–3874. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
3. Martino J.P. Technological forecasting – An overview. *Management Science*, 1980, vol. 26, no. 1, pp. 28–33.
4. Ryzhikova T.N., Borovskii V.G. Issledovanie strategicheskikh perspektiv modernizatsii stankostroeniya [Exploring the strategic perspectives for machine tool industry modernization]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, no. 5, pp. 835–850. DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
5. Ghani J.A., Rizal M., Haron C.H.C. Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 85, pp. 289–292. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.029.
6. Fernando W.L.R., Karunathilake H.P., Gamage J.R. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 3, p. 100100. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100100.
7. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obrabatyvayushchikh tekhnologii, integriruemyykh na edinoi stanochnoi baze [Improving the efficiency of surfacethermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/19946309202123.34571.
8. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinergiya gibridnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.
9. Makarov V.M. Kompleksirovannye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
11. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F., eds. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan. London, Springer, 2008. 556 p. ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
12. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
13. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, iss. 1, pp. 433–436. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
14. Skeebe V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
15. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: theory and applications*. Springer International Publ., 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. ISBN 978-3-319-47452-6. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.
16. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
17. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie. Tekhnologicheskie aspekty integratsii operatsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 348 p. ISBN 978-5-7782-3988-3.
18. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

19. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 8, pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.
20. You K., Yan G., Luo X., Gilchrist M.D., Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 677–692. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.
21. Skeeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595
22. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibrinaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnopofil'nykh izdelii [Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.
23. Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T. Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, vol. 27, iss. 12, pp. 1149–1164. DOI: 10.1007/BF00326472.
24. Madhavulu G., Ahmed B. Hot Machining Process for improved metal removal rates in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, vol. 44, pp. 199–206. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.
25. Wu C., Zhang T., Guo W., Meng X., Ding Z., Liang S.Y. Laser-assisted grinding of silicon nitride ceramics: Micro-groove preparation and removal mechanism. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, iss. 21, pp. 32366–32379. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.180.
26. Rao T.B. Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, pp. 1020–1034. DOI: 10.1080/14484846.2020.1769458.
27. Olsson M., Akujärvi V., Ståhl J.-E., Bushlya V. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 97, p. 105520. DOI: 10.1016/j.jrmhm.2021.105520.
28. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 106–115.
29. Kim S.-G., Lee C.-M., Kim D.-H. Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 3016–3027. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.130.
30. Lee Y.-H., Lee C.-M. A study on optimal machining conditions and energy efficiency in plasma assisted machining of Ti-6Al-4V. *Materials*, 2019, vol. 12, p. 2590. DOI: 10.3390/ma12162590.
31. Liao Z., Xu D., Luna G.G., Axinte D., Augustinavicius G., Sarasua J.A., Wretland A. Influence of surface integrity induced by multiple machining processes upon the fatigue performance of a nickel based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 298, p. 117313. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117313.
32. Lee C.M., Kim D.H., Baek J.T., Kim E.-J. Laser assisted milling device: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2016, vol. 3, iss. 2, pp. 199–208. DOI: 10.1007/s40684-016-0027-1.
33. Wiedenmann R., Zaeh M.F. Laser-assisted milling – Process modeling and experimental validation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, vol. 8, pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.08.003.
34. López de Lacalle L.N., Sánchez J.A., Lamikiz A., Celaya A. Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, iss. 2, pp. 274–285. DOI: 10.1115/1.1644548.
35. Baek J.-T., Woo W.-S., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of induction and laser-induction assisted machining of AISI 1045 steel and Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pt. A, pp. 513–522. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.030.
36. Guerrini G., Lutey A.H.A., Melkote S.N., Fortunato A. High throughput hybrid laser assisted machining of sintered reaction bonded silicon nitride. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 252, pp. 628–635. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.019.
37. Liu J., Li Y., Chen Y., Zhou Y., Wang S., Yuan Z., Jin Zh., Liu X. A review of low-temperature plasma-assisted machining: from mechanism to application. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 18, iss. 1, p. 18. DOI: 10.1007/s11465-022-0734-y.
38. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, iss. 12, pp. 2055–2067. DOI: 10.1243/09544054JEM562.



39. Widłaszewski J., Nowak M., Nowak Z., Kurp P. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718. *Physical Sciences Forum*, 2022, vol. 4. iss. 1, p. 26. DOI: 10.3390/psf2022004026.
40. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium. *Advances Engineering Materials*, 2008, vol 10, iss. 6, pp. 565–572. DOI: 10.1002/adem.200700349.
41. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials. *Procedia Manufacturing*, 2016, vol. 5, pp. 1337–1347. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.
42. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of Inconel 718 using Nd:YAG laser source. *Journal of Advanced Research*, 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 407–423. DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.
43. Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear*, 2015, vol. 328–329, pp. 518–530. DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.
44. Ul Hasan S., Ali S., Jaffery S.H.I., Ud Din E., Mubashir A., Khan M. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V). *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 4398–4408. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.
45. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, iss. 3, pp. 601–613. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.
46. Gurabvaiah Punugupati, Kishore Kumar Kandi, Bose P.S.C., Rao C.S.P. Laser assisted machining: a state of art review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 149, p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.
47. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V. Gibrinnoe 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 978-5-77823690-5.
48. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, p. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
49. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.
50. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.
51. Jeon Y., Lee C.M. Current research trend on laser assisted machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, iss. 2, pp. 311–317. DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.
52. Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M. A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 748–753. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.
53. Kim J., Zani L., Abdul-Kadir A., Roy A., Baxevanakis K.P., Jones L.C.R., Silberschmidt V.V. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 86, pp. 109–125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.
54. Lv B., Lin B., Cao Z., Liu W., Wang G. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89, pp. 371–383. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.
55. Witte J., Huebler D., Schroepfer D., Boerner A., Kannengiesser T. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling. *Wear*, 2023, vol. 522, p. 204722. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.
56. Xu M., Wei R., Li C., Ko T.J. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 85, pp. 1116–1132. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.
57. Dumitrescu P., Koshy P., Stenekes J., Elbestawi M.A. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 46, iss. 15, pp. 2009–2016. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.

58. Kim E.-J., Lee C.-M. Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 411–420. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.
59. Ma Z., Wang Z., Wang X., Yu T. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 1, pp. 921–929. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.
60. Choi Y.H., Lee C.M. A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pp. 463–476. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.
61. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyshev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.
62. Kim E.J., Lee C.M. A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 2, p. 233. DOI: 10.3390/ma12020233.
63. Xu D., Liao Z., Axinte D., Sarasua J.A., M'Saoubi R., Wretland A. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy. *Materials & Design*, 2020, vol. 194, p. 108851. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.
64. Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 499–508. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.
65. Ha J.-H., Lee C.-M. A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 7, p. 1032. DOI: 10.3390/ma12071032.
66. Woo W.S., Lee C.M. A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, vol. 5, iss. 5, pp. 593–604. DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.
67. Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R. A thermal simulation model for laser-assisted milling. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 353–362. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.
68. Brecher C., Emonts M., Rosen C.-J., Hermani J.-P. Laser-assisted milling of advanced materials. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.
69. Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P. Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – A comprehensive review. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 1626–1636. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.
70. Kim I.-W., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 636–645. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.
71. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V., Parts K.A., Cha G.O. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022038. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.
72. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 25, p. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
73. Skeebe V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin, pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
74. Ivancivsky V.V. *Upravlenie strukturnym i napryazhennym sostoyaniem poverkhnostnykh sloev detalei mashin pri ikh uprochnenii s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh istochnikov nagreva i finishnogo shlifovaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Control of structural and stress state of the surface layers of machine parts during their hardening using concentrated sources of heat and abrasive finishing. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2012. 425 p.
75. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. Effektivnost' ob"edineniya operatsii poverkhnostnoi zakalki i shlifovaniya na odnom tekhnologicheskoy oborudovaniy [Integration effectiveness of operations of surface hardening and grinding on a single technology equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4, pp. 15–21.
76. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 115, p. 104632. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.



77. Javaheri V., Haiko O., Sadeghpour S., Valtonen K., Kömi J., Porter D. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening. *Wear*, 2021, vol. 476, p. 203678. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.
78. Asadzadeh M.Z., Raninger P., Prevedel P., Ecker W., Mücke M. Hybrid modeling of induction hardening processes. *Applications in Engineering Science*, 2021, vol. 5, p. 100030. DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.
79. Areitioaurtena M., Segurajauregi U., Urresti I., Fisk M., Ukar E. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 545–550. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.
80. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications. *Engineering Science and Technology*, 2021. DOI: 10.1016/j.jestech.2021.05.010.
81. Li F., Li X., Wang T., Rong Y.(K.), Liang S.Y. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 172, p. 105393. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.
82. Skeebe V.Yu., Zverev E.A., Skeebe P.Yu., Chernikov A.D., Popkov A.S. Gibrinnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: k voprosu ratsional'nogo vybora ob'ektov modernizatsii pri provedenii rabot, svyazannykh s doosnashcheniem standartnoi stanochnoi sistemy dopolnitel'nym kontsentrirovannym istochnikom energii [Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 45–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67.
83. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4, pp. 19–25.
84. Kazantsev M.E. *Postroenie strukturnykh skhem stankov i nastroiки ispolnitel'nykh dvizhenii* [Construction of block diagrams of machine tools and adjustment of executive movements]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1997. 54 p.
85. Ptitsyn S.V., Levitskii L.V. *Strukturnyi analiz i sintez kinematiki metallovezhushchikh stankov* [Structural analysis and kinematics synthesis of machine tools]. Kiev, UMK Publ., 1989. 70 p.
86. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 408 p.
87. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Nos O.V., Zverev E.A., Martynova T.G., Vakhrushev N.V., Vanag Yu.V., Titova K.A., Cha G.O., Skiba P.Yu. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya gibridnogo metalloobrabatvayushchego oborudovaniya, ob"edinyayushchego mekhanicheskuyu i poverkhnostno-termicheskuyu operatsii* [Improving the efficiency of the conceptual design of the integrated metal-cutting equipment, combining mechanical and surface thermal operation]. Report on the research work of the project N 9.11829.2018/11.12. State registration no. AAAA-B19-219020690026-1, 2018. 197 p.
88. Vragov Yu.D. *Analiz komponentov metallovezhushchikh stankov (Osnovy komponentiki)* [Analysis of the layout of machine tools. The basics of compositing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.
89. Ivakhnenko A.G. *Povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya metallovezhushchikh stankov na osnove strukturnogo sinteza formoobrazuyushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the early stages of designing machine tools based on the structural synthesis of shaping systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1998. 244 p.
90. Ivakhnenko A.G. *Kontseptual'noe proektirovanie metallovezhushchikh sistem. Strukturnyi sintez* [Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998. 124 p.
91. Nakaminami M., Tokuma T., Matsumoto K., Sakashita S., Moriwaki T., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – II – Investigation of basic structure. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 87–93. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.
92. Nakaminami M., Tokuma T., Moriwaki M., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – I – Analysis of requirements and specifications. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 78–86. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.
93. Mekid S., ed. *Introduction to precision machine design and error assessment. Mechanical and Aerospace Engineering Series*. Boca Raton, CRC Press, 2008. 302 p. ISBN 0849378869. ISBN 978-0849378867.
94. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. *Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem* [Structural-parametric synthesis of technological systems]. Kursk, KurskSTU Publ., 2010. 151 p.

95. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallovezhushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.
96. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Y., Ivakhnenko E.O., Oleinik A.V. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 901–905. DOI: 10.3103/S1068798X17100112.
97. Balakshin B.S. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 560 p.
98. Ivashchenko I.A. *Tekhnologicheskie razmernye raschety i sposoby ikh avtomatizatsii* [Technological dimensional calculations and methods of their automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 222 p.
99. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook*. Vol. 9. *Metallography and microstructures*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN 978-0-87170-706-2.
100. Totten G.E., Howes M., Inoue T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International Publ., 2002. 499 p. ISBN 978-0-87170-729-1.
101. Sharpe W.N., ed. *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Leipzig, New York, Springer Science and Business Media, 2008. 1098 p. ISBN 978-0-387-26883-5.
102. Skeebe V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Структура и свойства композиционного покрытия на основе высокоэнтропийного сплава, упрочненного частицами CrB

Алексей Руктуев^{1, a, *}, Александр Юргин^{1, b}, Владислав Шикалов^{2, c}, Арина Ухина^{3, d}, Иван Чакин^{4, e},
Евгений Домаров^{4, f}, Глеб Довженко^{5, g}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, ул. Кутателадзе, 18, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 11, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁵ Центр коллективного пользования «СКИФ», Институт катализа им. Г.И. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, Кольцово, 630559, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-1325-1533>,  ruktuev@corp.nstu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0473-7627>,  yurgin2012@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>,  v.shikalov@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-1878-0538>,  auhina181@gmail.com,
^e  <https://orcid.org/0000-0003-0529-2017>,  chak_in2003@bk.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>,  domarov88@mail.ru,
^g  <https://orcid.org/0000-0003-0615-0643>,  g.d.dovjenko@srf-skif.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.79

История статьи:

Поступила: 07 апреля 2023

Рецензирование: 25 апреля 2023

Принята к печати: 11 мая 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Электронно-лучевая наплавка
 Борид хрома
 CoCrFeNiMn
 Высокоэнтропийный сплав
 Покрытие

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00189, <https://rscf.ru/project/22-79-00189/>.

Благодарности

Микроструктурные исследования проведены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (НГТУ), испытания на износостойкость проведены в ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время активно ведутся исследования такого нового класса материалов, как высокоэнтропийные сплавы. Одно из направлений их применения – создание защитных покрытий с высоким комплексом эксплуатационных свойств. Высокоэнтропийный сплав состава CoCrFeNiMn обладает высокой пластичностью, сохраняющейся как при повышенных, так и при криогенных температурах, а также высокой термической стабильностью и может рассматриваться в качестве перспективного для создания защитных покрытий. Однако его недостатки – низкая твердость и низкие прочностные характеристики. Известно, что введение упрочняющих частиц является эффективным способом повышения механических свойств покрытий. Предполагается, что введение упрочняющих частиц на основе боридов окажет положительное влияние на механические характеристики высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn. **Целью работы** является изучение структурно-фазового состояния и износостойкости покрытий на основе высокоэнтропийного сплава состава CoCrFeNiMn, упрочненного частицами CrB. В работе исследованы покрытия, полученные методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей с различным соотношением массы металлических порошков CoCrNiMn и массы порошка CrB (100:0, 95:5, 90:10, 80:20, 70:30). Для изучения структурно-фазового состава покрытий использовались следующие **методы исследования**: оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия и рентгенофазовый анализ. Для изучения элементного состава применялся метод микроанализа спектров энергодисперсионного анализа. Механические свойства оценивались по результатам измерения микротвердости покрытий. Износостойкость покрытий определяли в условиях сухого трения скольжения при возвратно-поступательном движении. **Результаты и обсуждение.** Введение порошка CrB в состав наплавляемой смеси приводит к формированию эвтектических структур. При введении в наплавочную смесь 5 масс. % CrB в покрытие формируется доэвтектическая структура. Увеличение количества CrB приводит к формированию покрытий с заэвтектической структурой, содержащей первичные бориды. Основными фазами, выявляемыми в составе покрытий, являются ГЦК-твердый раствор, бориды типа (Cr,Mn,Fe)2B, (Ni,Co,Mn)2B, а также CrB. Для всех исследуемых покрытий характерен адгезионный механизм изнашивания. Введение в состав порошковой смеси 20 и 30 % CrB приводит к повышению износостойкости покрытия на основе высокоэнтропийного сплава в 3,6 и 6,1 раза соответственно.

Для цитирования: Структура и свойства композиционного покрытия на основе высокоэнтропийного сплава, упрочненного частицами CrB / А.А. Руктуев, А.Б. Юргин, В.С. Шикалов, А.В. Ухина, И.К. Чакин, Е.В. Домаров, Г.Д. Довженко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 87–103. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-87-103.

*Адрес для переписки

Руктуев Алексей Александрович, к.т.н., доцент
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: +7 (383) 346-06-12, e-mail: ruktuev@corp.nstu.ru

Введение

Интенсивный износ изделий, работающих в условиях трения, повышенных температур и агрессивных сред является одной из проблем эксплуатации машиностроительного оборудования. Для обеспечения долговременной работы материалы, эксплуатирующиеся в подобных условиях, должны обладать высокой износостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью, а также вязкостью разрушения. Традиционно применяемые материалы на основе металлических сплавов, керамик или интерметаллидов не всегда могут обеспечить необходимый уровень эксплуатационных свойств. В последние 15 лет активно исследуется новый подход, основанный на сплавлении нескольких элементов с концентрацией каждого 5–35 ат. % [1, 2]. Такие материалы за счет высокой конфигурационной энтропии получили название высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Подобный подход приводит к практически безграничному количеству возможных композиций сплавов. В исследованиях [3–6] отмечается, что ВЭС могут обладать комплексом высоких физических и механических свойств, таких как большая прочность при повышенных и криогенных температурах, высокая пластичность, хорошая коррозионная стойкость и износостойкость. В то же время следует отметить, что в состав ВЭС входит большое количество дорогостоящих элементов, что приводит к высокой стоимости сплавов.

Эффективным решением проблемы стоимости и одновременного повышения эксплуатационных характеристик изделий является формирование на их поверхностях защитных слоев, свойства которых выгодно отличаются от свойств основного материала. Отмеченные выше особенности ВЭС позволяют рассматривать их в качестве перспективных материалов для создания защитных покрытий [7, 8]. Для создания конструкционных покрытий из высокоэнтропийных сплавов могут применяться различные технологии, такие как лазерная наплавка [9–11], плазменное напыление [12, 13] и другие [7]. В настоящей работе для формирования покрытий был использован метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки [14], который ранее успешно применялся для формирования защитных по-

крытий на нержавеющих сталях [15, 16], титане [17] и низкоуглеродистых сталях [18–20].

Одним из хорошо изученных высокоэнтропийных сплавов является сплав состава CoCrFeNiMn [21–26], также известный как сплав Кантора. Он характеризуется высокой пластичностью [27], сохраняющейся как при повышенных, так и при криогенных температурах, а также высокой термической стабильностью, но низкими прочностными характеристиками. Для повышения комплекса механических свойств сплава CoCrFeMnNi могут применяться различные подходы, основанные на холодной пластической деформации [28], термомеханической обработке, оптимизации элементного состава сплава [29] и введении дополнительных элементов, например алюминия или ванадия [30, 31]. Другой подход к повышению свойств заключается в получении сплавов или покрытий с композиционной структурой, состоящей из высокоэнтропийной матрицы, упрочненной керамическими частицами. В настоящее время опубликованы работы, в которых в качестве упрочняющих частиц использованы карбиды TiC [9, 10, 32], SiC [33], WC [34], оксиды и нитриды [35]. В отмеченных работах показано, что создание композиционной структуры позволяет эффективно повышать прочностные и триботехнические свойства высокоэнтропийных сплавов. Еще одним типом частиц, позволяющих повысить твердость и износостойкость материалов, являются бориды [36, 37]. Однако следует отметить, что вопрос влияния борсодержащих соединений на структуру и свойства высокоэнтропийных сплавов исследован не так обширно.

Цель работы заключается в изучении структурно-фазового состояния покрытий на основе высокоэнтропийного сплава состава CoCrFeNiMn , упрочненного частицами CrB , а также влияния боридов на уровень износостойкости упрочненных слоев.

Методика исследований

Образцы с покрытиями были получены методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6М в ИЯФ СО РАН. В качестве материала основы были взяты заготовки из стали 20 размером $100 \times 50 \times 10$ мм. Для формирования

покрытий использовалась порошковая смесь, состоящая из порошков металлов (Co, Cr, Ni, Mn), порошка борида хрома и порошка флюса. В качестве флюса для защиты ванны расплава от взаимодействия с атмосферой использовали порошок CaF_2 . Порошки металлов технической чистоты предварительно смешивали в эквивалентном соотношении. Для получения серии экспериментальных образцов были подготовлены смеси с различным соотношением смеси металлических порошков CoCrNiMn к порошку CrB по массе (100:0, 95:5, 90:10, 80:20, 70:30). Соотношение масс наплавляемых порошков и флюса было постоянным и составляло 7:3. Следует отметить, что порошок железа в состав смеси не вводился; железо в покрытие поступало при плавлении материала основы. Составы использованных порошковых смесей представлены в табл. 1. Подготовленная смесь наносилась на поверхность стальной заготовки с поверхностной плотностью $0,8 \text{ г/см}^2$.

Основные технологические режимы процесса наплавки, влияющие на плотность энергии,

представлены в табл. 2. Скорость перемещения заготовки и ток пучка электронов были подобраны таким образом, чтобы обеспечить эквивалентный состав покрытия типа Co-Cr-Fe-Ni-Mn, не содержащего частиц CrB (режим 1). В режимах 3, 4 и 5 ток пучка электронов был повышен, чтобы компенсировать возрастание температуры плавления порошковой смеси.

Микроструктура покрытий исследовалась на поперечных шлифах, подготовленных по стандартной методике, которая заключается в шлифовании на абразивной шкурке с постепенным снижением размера абразивных частиц с P180 до P4000 и финишном полировании с применением суспензии оксида алюминия с размером частиц $0,3 \text{ мкм}$. Для выявления структуры выполнялось химическое травление раствором, состоящим из $10 \text{ мл HNO}_3 + 10 \text{ мл HF} + 15 \text{ мл H}_2\text{O}$ в течение $10...60 \text{ с}$. Исследование микроструктуры проводилось на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver Z1.m и растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального

Таблица 1

Table 1

Составы порошковых смесей для наплавки
Compositions of surfacing powder mixtures

№	Наплавляемые порошки, масс. %	Флюс, масс. %
1	CoCrNiMn 70 %	CaF ₂ 30 %
2	(CoCrNiMn : CrB 95:5) 70 %	
3	(CoCrNiMn : CrB 90:10) 70 %	
4	(CoCrNiMn : CrB 80:20) 70 %	
5	(CoCrNiMn : CrB 70:30) 70 %	

Таблица 2

Table 2

Технологические режимы наплавки
Technological modes of surfacing

№	Состав	Ток пучка, мА	Ускоряющее напряжение, МВ	Скорость перемещения, см/сек	Плотность энергии, КДж/см ²
1	CoCrNiMn	25	1,4	1,5	4,67
2	CoCrNiMn : CrB 95:5	25			
3	CoCrNiMn : CrB 90:10	26,5			
4	CoCrNiMn : CrB 80:20	26,5			4,95
5	CoCrNiMn : CrB 70:30	26,5			

энергодисперсионного анализа Oxford Instruments INCA X-Act.

Исследование фазового состава покрытий проводили с применением рентгеновского дифрактометра Bruker D8 ADVANCE с использованием $\text{Cu-K}\alpha$ -излучения. Дифракционные картины регистрировались в диапазоне углов $2\theta = 15 \dots 90^\circ$ с шагом $0,02^\circ$. Время накопления на точку составляло 0,2 с. Расшифровка рентгенограмм проводилась с использованием базы данных ICDD PDF4+.

Микротвердость покрытий определялась по методу Виккерса на твердомере WolpertGroup 402 MVD на полированных поперечных шлифах. Нагрузка на индентор составляла 100 г, время приложения нагрузки – 15 с.

Износостойкость покрытий оценивалась в условиях сухого трения скольжения при возвратно-поступательном движении. Испытания по схеме «шар – плоскость» проводили в соответствии с рекомендациями стандарта ASTM G133-05 на универсальной машине трения Bruker UMT-2. В качестве контртела использовался шарик диаметром 6,35 мм из сплава ВК-6.

Покрyтия испытывали при следующих параметрах: нагрузка на контртелo – 25 Н, длина перемещения за один цикл – 5 мм, общая длина пути трения – 100 м. Перед испытаниями образцы шлифовали и полировали по методу пробоподготовки для микроструктурных исследований. Объем изношенного материала определяли с помощью оптического профилометра Bruker Contour GT-K1.

Результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры покрытий

В поперечном сечении материалов с покрытиями можно выделить несколько зон, формирование которых является характерным при реализации наплавочных технологий: зона покрытия, зона термического влияния в материале основы и зона основного металла, не подвергнутого значительному нагреву. Толщина наплавленных слоев составила ~ 1 мм. В структуре всех покрытий при небольших увеличениях четко выявляется дендритная неоднородность (рис. 1).

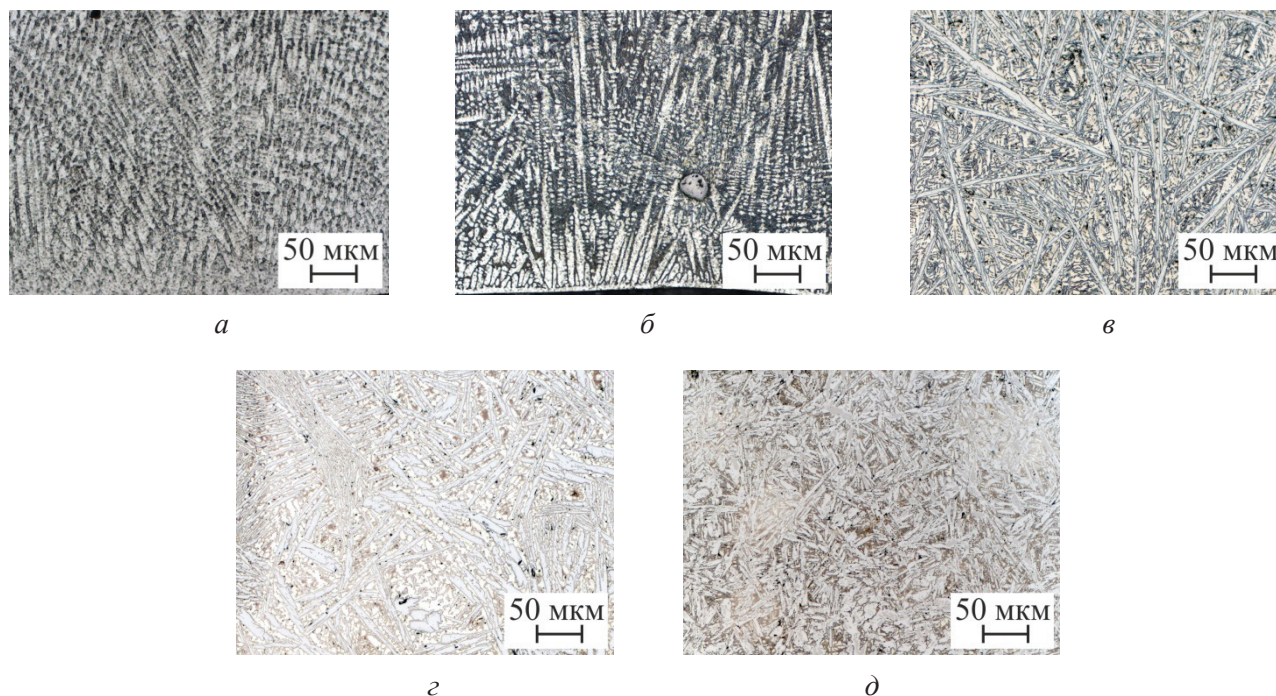


Рис. 1. Микроструктура образцов, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием CrB :

$a - 0\% \text{ CrB}$; $б - 5\% \text{ CrB}$; $в - 10\% \text{ CrB}$; $г - 20\% \text{ CrB}$; $д - 30\% \text{ CrB}$

Fig. 1. Microstructure of the specimens obtained by surfacing the powder mixtures with different CrB content:

$a - 0\% \text{ CrB}$; $б - 5\% \text{ CrB}$; $в - 10\% \text{ CrB}$; $г - 20\% \text{ CrB}$; $д - 30\% \text{ CrB}$

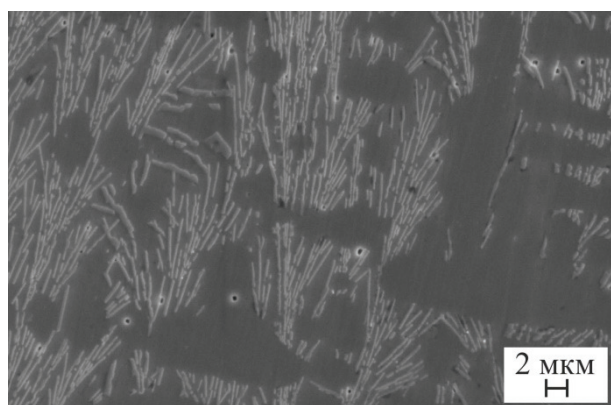
В покрытии, полученном без добавки CrB, выявляемая дендритная неоднородность связана с перераспределением элементов при кристаллизации, в результате чего междендритное пространство обогащено марганцем и никелем, в то время как в дендритах наблюдается дефицит указанных элементов, однако формируемая при этом структура является однофазной. Детальный анализ структуры покрытия состава CoCrFeNiMn был представлен ранее в работе [38]. Формирование дендритной неоднородности в покрытиях, полученных с добавлением порошка CrB, сопровождается выделением боридных фаз различной морфологии и состава. Следует отметить, что в покрытиях без CrB и с 5 % CrB (здесь и далее использованы масс. %, если не указано иное) (рис. 1, а, б), четко выделяется вертикальная направленность формируемой структуры, что можно объяснить малым количеством центров кристаллизации и высоким градиентом температур, возникающим за счет преимущественного отвода тепла в сторону материала основы. В покрытиях, полученных при содержании 10...30 % CrB (рис. 1, в–д), в структуре выявляются первичные бориды, которые, предположительно, препятствуют формированию направленной структуры при кристаллизации ванны расплава.

На рис. 2 представлена микроструктура покрытий, полученных наплавкой смесей с 5 и

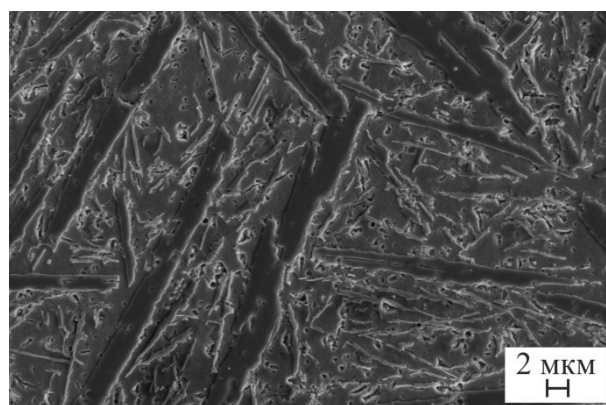
10 % CrB. Добавление 5 % CrB приводит к формированию покрытия с доэвтектической структурой, представленной металлической матрицей и мелкодисперсной пластинчатой эвтектикой, расположенной в междендритных областях. Структура покрытий, полученных из смесей, содержащих 10 % CrB, имеет заэвтектическое строение. Происходит образование первичных боридов, в промежутках между которыми образуется пластинчатая эвтектическая структура (рис. 2, б).

На рис. 3 приведены карты распределения элементов в покрытии, полученном из смеси, содержащей 10 % CrB. Карта распределения бора не представлена в связи с низкой точностью определения легких элементов методом энергодисперсионного анализа. Из представленного рисунка видно, что концентрация хрома максимальна в кристалле первичного борида и эвтектических боридов, но снижается в металлической матрице. Марганец и железо распределены более равномерно и присутствуют как в боридов, так и в матрице, в то время как никель и кобальт находятся преимущественно в матрице.

Увеличение количества CrB в наплавляемой смеси до 20 % и более приводит к существенному изменению структуры покрытия (рис. 4). Главным отличием от ранее рассмотренных покрытий является смена типа формируемой эвтектики с пластинчатой на «скелетную».



а



б

Рис. 2. Микроструктура боридов в покрытиях, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием CrB:

а – 5 % CrB; б – 10 % CrB

Fig. 2. Microstructure of borides in the coatings obtained by surfacing the powder mixtures with different CrB content:

а – 5 % CrB; б – 10 % CrB

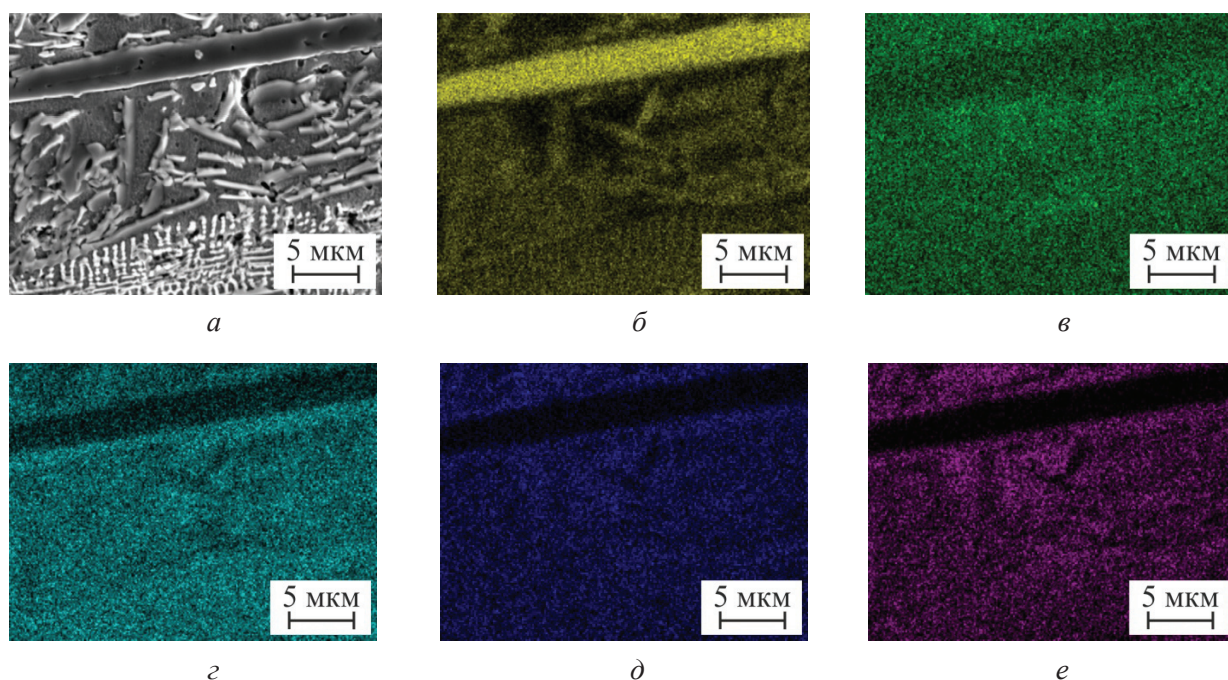


Рис. 3. Распределение элементов в структуре покрытия, полученного наплавкой порошковой смеси с 10 % CrB:

a – микроструктура анализируемой области; *б* – Cr; *в* – Mn; *г* – Fe; *д* – Co; *е* – Ni

Fig. 3. Distribution of elements in the structure of the coating obtained by surfacing the powder mixture with 10 % CrB:

a – microstructure of the analyzed region; *б* – Cr; *в* – Mn; *г* – Fe; *д* – Co; *е* – Ni

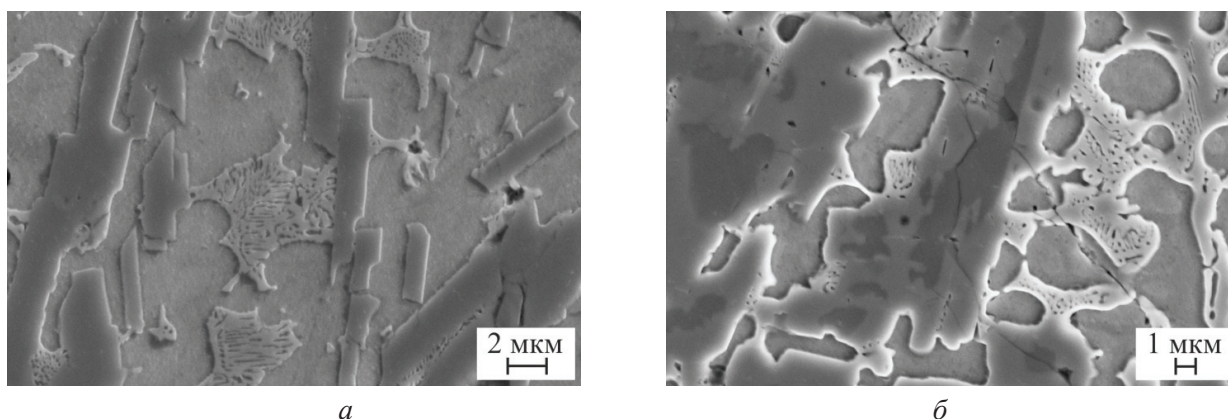


Рис. 4. Микроструктура боридов в покрытиях, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием CrB:

a – 20 % CrB; *б* – 30 % CrB

Fig. 4. Microstructure of borides in the coatings obtained by surfacing the powder mixtures with different CrB content:

a – 20 % CrB; *б* – 30 % CrB

Структура покрытий также представлена первичными боридами, в промежутках между которыми расположены участки образовавшейся эвтектики. Следует отметить, что методами химического травления не удалось выявить межфазных границ между первичными боридами и

эвтектическими колониями. Таким образом, эвтектика «срастается» с первичными боридами, что отчетливо видно на рис. 4, б.

Отмеченная выше смена морфологии эвтектических боридов, предположительно, связана с изменением их состава и типа кристаллической

решетки. В табл. 3 представлены результаты элементного анализа боридов эвтектики. Видно, что при добавлении 5 и 10 % CrB основным элементом в составе боридов является хром (табл. 3 и рис. 3). Увеличение доли боридов в наплавляемой смеси свыше 10 % приводит к изменению элементного состава эвтектических боридов: основным элементом в них становится Ni, а доля хрома снижается до 3–4 % (табл. 3, рис. 5). Отмеченные изменения элементного состава приводят к смене типа кристаллической решетки,

что будет показано далее при обсуждении данных рентгенофазового анализа.

Кроме того, в центральной части первичных боридов, которые образовались в покрытии, полученном наплавкой смеси, содержащей 30 % CrB, обнаруживаются более темные участки (рис. 4, б). Элементный анализ (рис. 5) показал, что в таких областях концентрация хрома максимальна, в то время как массовая доля других металлов не превышает 3 %. Таким образом, эти области, предположительно, соответствуют

Таблица 3

Table 3

Элементный состав эвтектических боридов

Elemental composition of eutectic borides

Количество CrB в смеси, %	B, %	Cr, %	Mn, %	Fe, %	Co, %	Ni, %
5	6,4	24,1	18,5	12,3	19,7	19,0
10	7,2	43,6	15,3	10,2	12,1	11,6
20	4,6	3,4	26,2	5,2	27,0	33,7
30	4,9	3,7	22,2	12,6	24,3	32,3

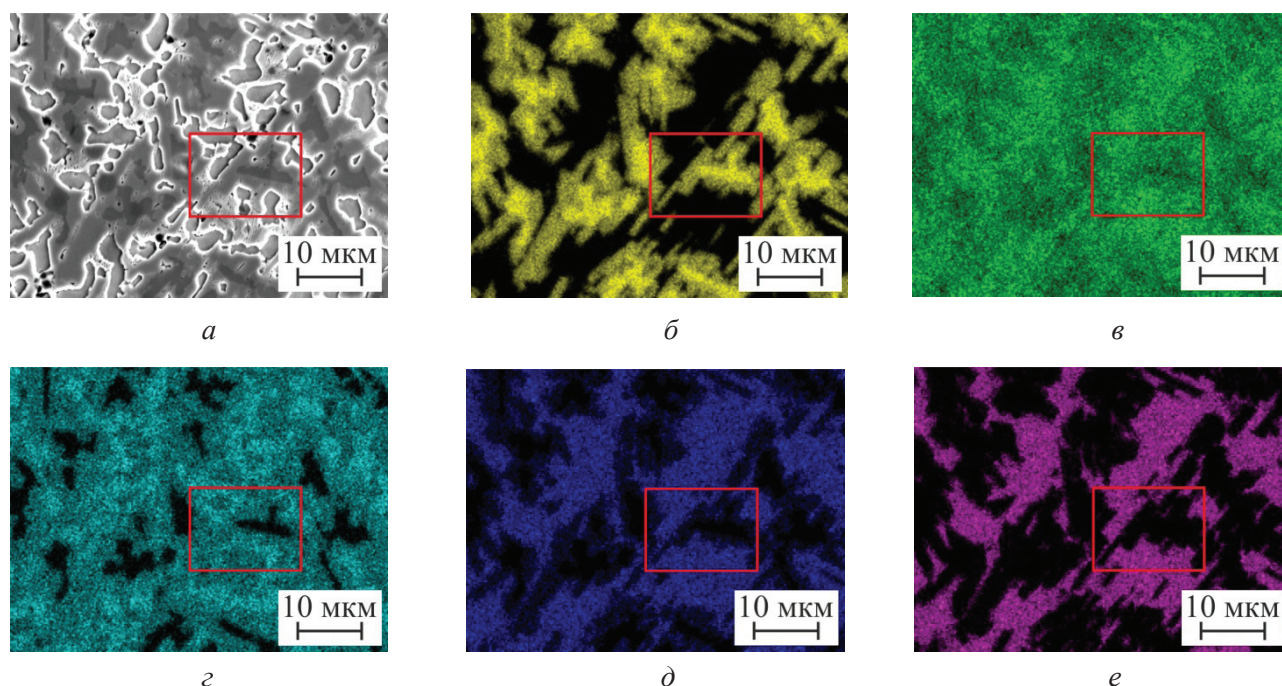


Рис. 5. Распределение элементов в структуре покрытия, полученного наплавкой порошковой смеси, содержащей 30 % CrB:

a – микроструктура анализируемой области; *б* – Cr; *в* – Mn; *г* – Fe; *д* – Co; *е* – Ni. Красной рамкой обозначена одинаковая анализируемая область

Fig. 5. Distribution of elements in the structure of the coating obtained by surfacing a powder mixture with 10 % CrB:

a – microstructure of the analyzed region; *б* – Cr; *в* – Mn; *г* – Fe; *д* – Co; *е* – Ni. The red square denotes the same analyzed region

боридам состава CrB. Вокруг них образуются кристаллы первичных боридов, содержащие помимо хрома также марганец и железо.

Исследование элементного состава наплавленных слоев показало, что на границе с материалом основы формируется переходная зона толщиной 50–150 мкм с повышенным содержанием железа по сравнению с основной частью покрытия (рис. 6). Структура этой зоны неоднородна: непосредственно над границей формируется слой толщиной до 10 мкм, в котором бориды не образуются (рис. 6, а, в). Выше отмеченного слоя в структуре появляются эвтектические бориды,

однако образования крупных первичных боридов не происходит. Образование переходного слоя должно благоприятно сказываться на комплексе механических свойств материалов, поскольку позволяет снизить градиент свойств между наплавленным слоем и материалом основы.

Рентгенофазовый анализ полученных покрытий

Дифрактограммы покрытий, полученных при различном содержании CrB, представлены на рис. 7. Сложность анализа полученных дифрактограмм заключается в том, что в системе

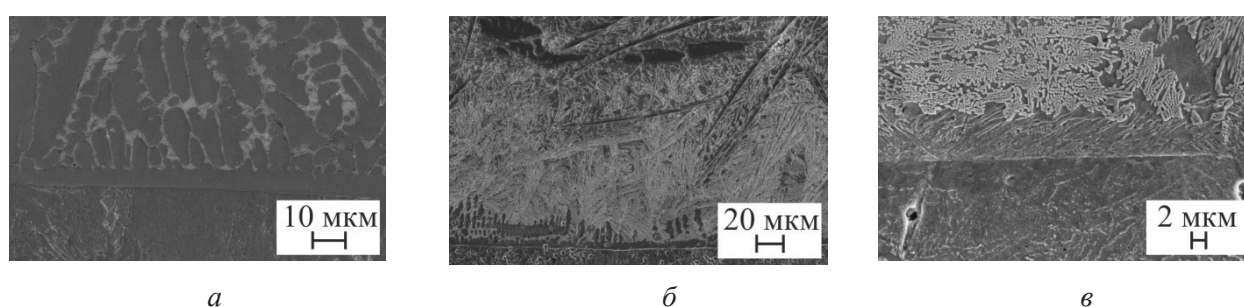


Рис. 6. Типичная микроструктура границы основы и покрытий, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием CrB:

а – 5 % CrB; б – 10 % CrB; в – 30 % CrB

Fig. 6. Typical microstructure of the interfaces between a substrate and coatings obtained by surfacing the powder mixtures with different CrB content:

а – 5 % CrB; б – 10 % CrB; в – 30 % CrB

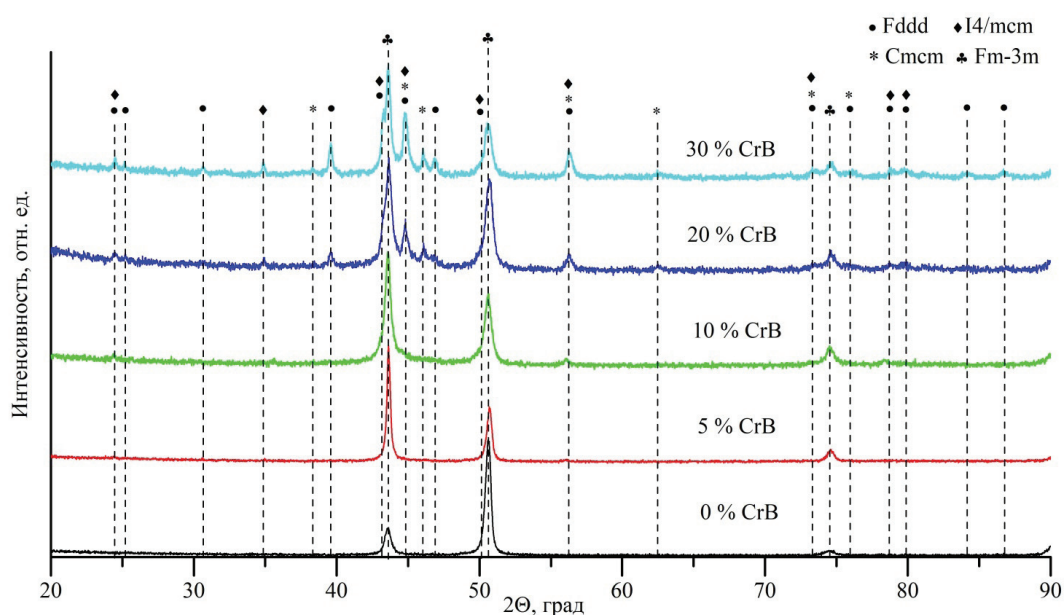


Рис. 7. Дифрактограммы покрытий, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием CrB

Fig. 7. X-ray diffraction patterns obtained by surfacing the powder mixtures with different CrB content

Co-Cr-Fe-Ni-Mn-B может образовываться большое количество боридов или твердых растворов на основе боридов с совпадающими пространственными группами симметрии (ПГС) и положением дифракционных максимумов. В связи с вышесказанным на рис. 7 представлена только пространственная группа симметрии, без указания конкретного состава фазы. Во всех образцах зафиксировано формирование твердого раствора с ГЦК-кристаллической решеткой. При этом покрытие, полученное без добавления частиц CrB, является однофазным. В образцах с 5 и 10 % CrB зарегистрированы слабые рефлексы в районе 31° , 56° и $78^\circ 2\theta$, которые соответствуют бориду с орторомбической кристаллической решеткой (ПГС Fddd). Среди таких боридов можно выделить Cr_2B , Mn_2B и твердые растворы на их основе: $(\text{Cr,Fe})_2\text{B}$, $(\text{Cr,Mn})_2\text{B}$. В соответствии с результатами энергодисперсионного анализа и микроструктурных исследований можно предположить, что в отмеченных покрытиях формируются бориды типа $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$.

Увеличение доли бориды хрома в наплавочной смеси до 20 и 30 % приводит к появлению на дифрактограммах рефлексов от боридов с орторомбической (ПГС Cmcm) и тетрагональной (ПГС I4/mcm) кристаллическими решетками.

В рассматриваемой системе бориды с решеткой, относящейся к ПГС Cmcm, являются CrB, FeB и MnB. Как было отмечено выше, в образце, полученном при наплавке смеси, содержащей 30 % CrB, наблюдаются области, близкие по составу к исходному бориду и практически не содержащие других элементов. Таким образом, можно предположить, что рефлексы от фазы с ПГС Cmcm соответствуют боридам CrB, образовавшимся из расплава или не до конца растворившимся в процессе наплавки.

Структурой с ПГС I4/mcm обладают такие бориды, как Mn_2B , Co_2B , Ni_2B и Fe_2B . Ранее было показано, что значительным отличием структуры покрытий с содержанием CrB ≥ 20 % является смена морфологии формируемой эвтектики с пластинчатой на «скелетную». При этом в «скелетной» эвтектике концентрация Cr и Fe значительно ниже, чем Co, Mn и Ni. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что боридная фаза в эвтектике представлена твердым раствором на базе химического соединения $(\text{Ni,Co,Mn})_2\text{B}$.

На основании проведенных исследований можно предположить следующую схему формирования фазового состава покрытий, полученных наплавкой порошковых смесей с различным содержанием CrB.

При концентрации CrB 5 % (формируется доэвтектическая структура):

- кристаллизация ванны расплава начинается с образования дендритов ГЦК-твердого раствора;
- повышение концентрации бора в расплаве приближает его состав к эвтектическому;
- в междендритном пространстве кристаллизуется эвтектика, состоящая из $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$ и ГЦК-фазы.

При концентрации CrB 10 % (формируется заэвтектическая структура):

- выделение первичных боридов $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$;
- кристаллизация эвтектики, состоящей из $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$ и ГЦК-фазы.

При концентрации CrB 20 и 30 %:

- первичное выделение из ванны расплава кристаллов CrB, обладающих более высокой температурой плавления, чем фаза Cr_2B ;
- формирование фазы $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$ вокруг кристаллов CrB;
- кристаллизация эвтектики, состоящей из $(\text{Ni,Co,Mn})_2\text{B}$ и ГЦК-твердого раствора.

Предполагается, что смена типа эвтектики с $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$ + ГЦК-фаза на $(\text{Ni,Co,Mn})_2\text{B}$ + ГЦК-фаза обусловлена уменьшением содержания хрома в расплаве в результате первичного выделения богатых хромом фаз типа CrB и $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$.

Результаты измерения микротвердости сформированных материалов

Оценка механических свойств покрытий проводилась путем измерения микротвердости по методу Виккерса. На рис. 8 представлены средние значения микротвердости наплавленных слоев. Среднее значение микротвердости покрытия, полученного без добавления порошка CrB, составила $192 \pm 5 \text{ HV}_{0,1}$, что соответствует твердости материала основы. Введение 5 % CrB привело к повышению твердости до $263 \pm 15 \text{ HV}_{0,1}$. Увеличение доли порошка CrB в наплавляемой смеси до 10, 20 и 30 % привело к повышению средних значений микротвердости до $543 \pm 59 \text{ HV}_{0,1}$, $762 \pm 43 \text{ HV}_{0,1}$ и $1141 \pm 91 \text{ HV}_{0,1}$ соответственно. Существенный рост твердости

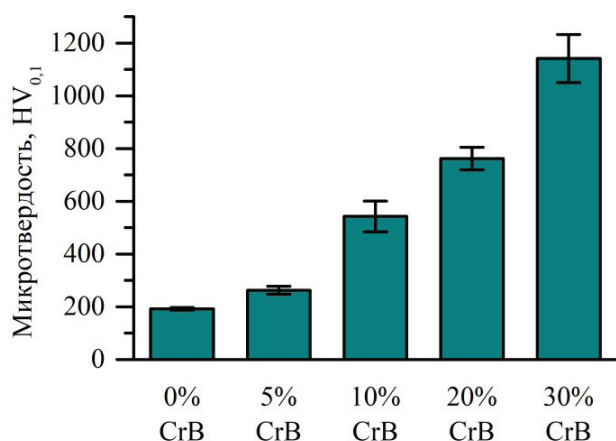


Рис. 8. Средняя микротвердость покрытия

Fig. 8. Average microhardness of the coatings

обусловлен образованием в структуре материала высокой доли боридов различного состава и морфологии.

Износостойкость покрытий

Отмеченные ранее изменения структуры и твердости покрытий должны оказывать влияние на их триботехнические характеристики. На рис. 9 представлены типичные графики изменения величины коэффициента трения от времени испытаний. На начальном этапе испытаний наблюдается процесс приработки, сопровождающийся постепенным ростом коэффициента трения. После этапа приработки значения коэффициента трения стабилизируются.

Установлено, что структура покрытий оказывает влияние на длительность процесса прира-

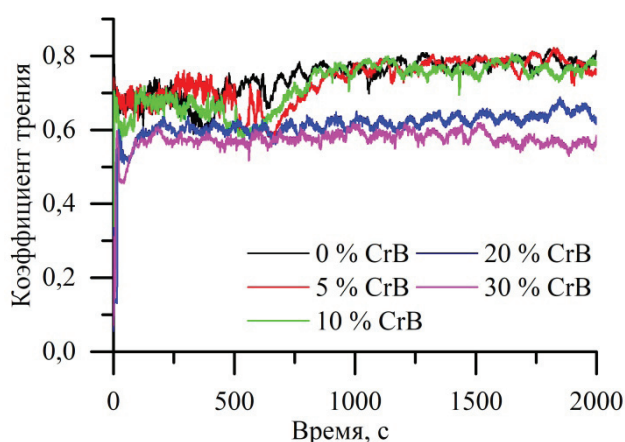


Рис. 9. График изменения величины коэффициента трения в процессе испытаний

Fig. 9. Graphical representation of the change in the value of the friction coefficient during testing

ботки. В материалах, полученных при наплавке смеси, которая содержит до 10 % CrB, длительность этого этапа составляет ~800 с. Повышение содержания CrB в наплавочной смеси до 20 и 30 % приводит к снижению времени приработки в четыре раза.

Средние значения коэффициента трения представлены в табл. 4. Установлено, что введение в порошковую смесь 5 и 10 % CrB не оказывает значительного влияния на значение коэффициента трения. При этом добавление 20 и 30 % CrB способствует снижению коэффициента трения с 0,71 до 0,62 и 0,57 соответственно.

Износостойкость наплавленных слоев оценивалась по объему лунки износа (табл. 4). Объем изношенного материала покрытий, полученных при добавлении 5 и 10 % CrB в наплавляемую смесь, больше, чем у эталонного материала. Увеличение доли частиц CrB до 20 и 30 % благоприятно сказывается на износостойкости исследуемых материалов. Установлено, что объем изношенного материала покрытий, полученных наплавкой смесей с 20 и 30 % CrB, составляет $0,17 \pm 0,04 \text{ мм}^3$ и $0,1 \pm 0,04 \text{ мм}^3$ соответственно, что в три и шесть раз ниже значения, полученного при испытании образца, не содержащего CrB ($0,61 \pm 0,1 \text{ мм}^3$).

Полученные характеристики износостойкости связаны с изменением структурно-фазового состояния покрытий, сформированных при добавлении различного количества упрочняющих частиц.

Анализ поверхности трения покрытия, полученного без добавления упрочняющих частиц, показал, что в процессе испытаний происходит пластическое вытеснение материала из зоны трения на периферию (рис. 10, а). Аналогичный характер строения лунки износа зафиксирован в покрытиях, содержащих 5 и 10 % CrB (рис. 10, б). Увеличение доли боридов до 20 % и сопутствующий рост микротвердости способствуют снижению пластической деформации. Как следствие, на поверхности трения вытеснения материала не наблюдается (рис. 10, в). Предполагается, что дополнительным фактором, препятствующим интенсивной пластической деформации материала покрытий, служит образование «скелетной» эвтектики. Как было отмечено ранее, такой тип эвтектики соединяет отдельные первичные бориды и образует пространственную сетку.

Таблица 4

Table 4

Средние значения коэффициента трения и объема изношенного материала
Average values of the friction coefficients and the worn material volumes

№	Состав	Коэффициент трения	Среднее значение объема изношенного материала, мм ³
1	CoCrFeNiMn	$0,71 \pm 0,22$	$0,61 \pm 0,1$
2	CoCrFeNiMn : CrB 95:5	$0,73 \pm 0,23$	$1,1 \pm 0,09$
3	CoCrFeNiMn : CrB 90:10	$0,68 \pm 0,22$	$0,77 \pm 0,08$
4	CoCrFeNiMn : CrB 80:20	$0,62 \pm 0,17$	$0,17 \pm 0,04$
5	CoCrFeNiMn : CrB 70:30	$0,57 \pm 0,15$	$0,1 \pm 0,04$

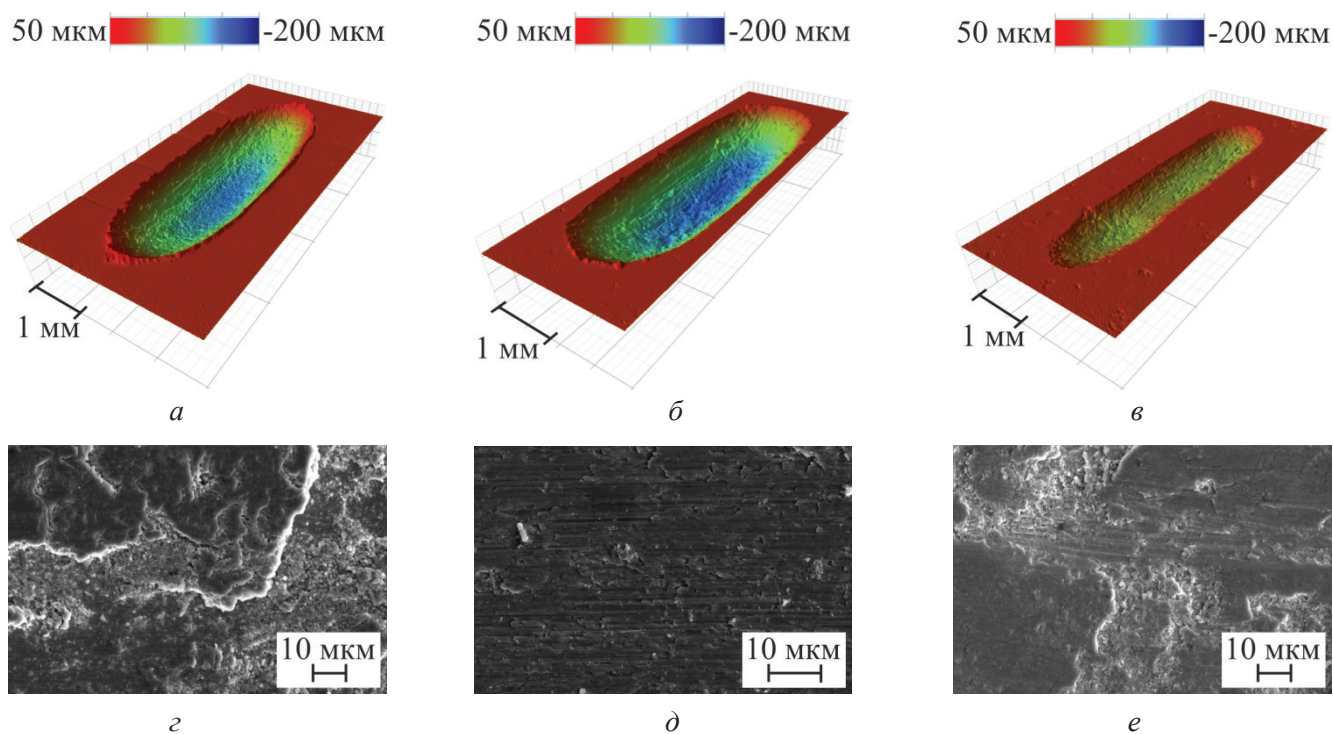


Рис. 10. Профили лунок изнашивания (а–в) и изображения поверхностей износа (з–е):

а, з – 0 % CrB; б – 10 % CrB; в – 20 % CrB; д – 5 % CrB; е – 30 % CrB

Fig. 10. Profiles of the wear grooves (a–e) and the wear surface micrographs (z–e):

а, з – 0 % CrB; б – 10 % CrB; в – 20 % CrB; д – 5 % CrB; е – 30 % CrB

Исследование поверхностей трения методом растровой электронной микроскопии позволило выявить признаки адгезионного механизма изнашивания покрытий. На поверхности покрытий были обнаружены следы схватывания, расслоения и разрушения материала покрытия (рис. 10, з, е). Наиболее активно отмеченные особенности проявляются на поверхности покрытия без упрочняющих частиц.

Введение 5 и 10 % CrB приводит к росту объема изношенного материала, несмотря на повышение средней микротвердости покрытий.

Вероятно, снижение износостойкости связано с образованием пластинчатой эвтектики. В процессе испытаний пластинчатая эвтектика разрушается. Продукты разрушения, находящиеся в зоне контакта между контртелом и образцом, приводят к абразивному износу материала покрытий (рис. 10, д). При большем содержании борида хрома в составе покрытий доля пластичной матрицы снижается, а средняя микротвердость покрытий повышается. В результате абразивный механизм изнашивания проявляется в меньшей степени.

Выводы

На основании проведенных исследований установлено, что независимо от количества вводимого в наплавочную смесь порошка CrB в покрытии формируется металлическая матрица на основе ГЦК-твердого раствора. Введение 5 и 10 % CrB приводит к формированию пластинчатой эвтектики, состоящей из кристаллов $(\text{Cr,Mn,Fe})_2\text{B}$ и ГЦК-твердого раствора. Увеличение количества CrB в наплавочной смеси до 20 % и более приводит к образованию металлической матрицы, обедненной хромом, формированию в структуре первичных боридов типа CrB, а также «скелетной» эвтектики, состоящей из $(\text{Ni,Co,Mn})_2\text{B}$ и ГЦК-твердого раствора.

Повышение доли CrB в порошковой смеси с 0 до 30 % способствует повышению среднего значения микротвердости покрытий с 192 HV до 1141 HV_{0.1}. При испытании исследуемых покрытий на износостойкость по схеме «шар – плоскость» зафиксирован адгезионный механизм износа. Введение 5 и 10 % CrB приводит к дополнительному абразивному изнашиванию частицами эвтектических боридов и, соответственно, снижению износостойкости покрытий. Повышение содержания CrB в наплавочной смеси до 20 и 30 % способствует увеличению износостойкости покрытий соответственно в три и шесть раз по сравнению с материалом, не содержащим CrB. Так, объем изношенного материала снижается с 0,61 мм³ (0 %) до 0,17 мм³ (20 % CrB) и 0,1 мм³ (30 % CrB) соответственно.

Список литературы

1. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6, iss. 5. – P. 299–303. – DOI: 10.1002/adem.200300567.
2. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Tsai M.H., Yeh J.W. High-entropy alloys: a critical review // *Materials Research Letters*. – 2014. – Vol. 2, iss. 3. – P. 107–123. – DOI: 10.1080/21663831.2014.912690.

4. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature Reviews Materials*. – 2019. – Vol. 4, iss. 8. – P. 515–534. – DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.

5. Steurer W. Single-phase high-entropy alloys – A critical update // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 162. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110179.

6. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu // *Progress in Materials Science*. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–93. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.

7. Duchaniya R.K., Pandel U., Rao P. Coatings based on high entropy alloys: An overview // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44. – P. 4467–4473. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.720.

8. Li W., Liu P., Liaw P.K. Microstructures and properties of high-entropy alloy films and coatings: a review // *Materials Research Letters*. – 2018. – Vol. 6, iss. 4. – P. 199–229. – DOI: 10.1080/21663831.2018.1434248.

9. Fabrication and wear behavior of TiC reinforced FeCoCrAlCu-based high entropy alloy coatings by laser surface alloying / P.F. Jiang, C.H. Zhang, S. Zhang, J.B. Zhang, J. Chen, Y. Liu // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 255. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123571.

10. In-situ TiC reinforced CoCrCuFeNiSi0.2 high-entropy alloy coatings designed for enhanced wear performance by laser cladding / Y. Guo, C. Li, M. Zeng, J. Wang, P. Deng, Y. Wang // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 242. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122522.

11. Gu Z., Xi S., Sun C. Microstructure and properties of laser cladding and CoCr2.5FeNi2Ti high-entropy alloy composite coatings // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 819. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152986.

12. Formation and mechanical properties of CoNiCuFeCr high-entropy alloys coatings prepared by plasma transferred arc cladding process / J.B. Cheng, X.B. Liang, Z.H. Wang, B.S. Xu // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 2013. – Vol. 33, iss. 5. – P. 979–992. – DOI: 10.1007/s11090-013-9469-1.

13. On the study of thermal-sprayed Ni_{0.2}Co_{0.6}Fe_{0.2}CrSi_{0.2}AlTi_{0.2} HEA overlay coating / W.L. Hsu, H. Murakami, J.W. Yeh, A.C. Yeh, K. Shimoda // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 316. – P. 71–74. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.02.073.

14. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere / S.N. Fadeev, M.G. Golkovski, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavruhin, S.E. Petrov, R.A. Salimov, A.F. Vaisman // *Radiation*



Physics and Chemistry. – 2000. – Vol. 57, iss. 3–6. – P. 653–655. – DOI: 10.1016/s0969-806x(99)00499-5.

15. Influence of chromium concentration on corrosion resistance of surface layers of stainless steel / N.F. Uvarov, E. Bushueva, Y. Turlo, G. Khamgushkeeva // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 340. – P. 1–5. – DOI: 10.1051/mateconf/202134001022.

16. Raising the resistance of chromium-nickel steel to hydroabrasive wear by non-vacuum electron-beam cladding with boron / E.G. Bushueva, B.E. Grinberg, V.A. Bataev, E.A. Drobyaz // Metal Science and Heat Treatment. – 2019. – Vol. 60, iss. 9–10. – P. 641–644. – DOI: 10.1007/s11041-019-00331-3.

17. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon / O.G. Lenivtseva, I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, V.V. Samoilenko, N.V. Plotnikova // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 355. – P. 320–326. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.07.043.

18. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

19. Non-vacuum electron-beam carburizing and surface hardening of mild steel / I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Losinskaya, A.A. Bataev, A.I. Popelyukh, T. Hassel, D.D. Golovin // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 322. – P. 6–14. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.09.137.

20. Formation of wear-resistant copper-bearing layers on the surfaces of steel substrates by non-vacuum electron beam acladding using powder mixtures / D.V. Lazurenko, G.I. Alferova, M.G. Golkovsky, K.I. Emurlaev, Y.Y. Emurlaeva, I.A. Bataev, T.S. Ogneva, A.A. Ruktuev, N.V. Stepanova, A.A. Bataev // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 395. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125927.

21. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // Progress in Materials Science. – 2021. – Vol. 120. – P. 1–36. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100754.

22. Nanomechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy / S. Mridha, S. Das, S. Aouadi, S. Mukherjee, R.S. Mishra // JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society. – 2015. – Vol. 67, iss. 10. – P. 2296–2302. – DOI: 10.1007/s11837-015-1566-6.

23. Mechanical properties and stacking fault energies of NiFeCrCoMn high-entropy alloy / A.J. Zaddach, C. Niu, C.C. Koch, D.L. Irving // JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society. – 2013. – Vol. 65, iss. 12. – P. 1780–1789. – DOI: 10.1007/s11837-013-0771-4.

24. The corrosion behavior of ultra-fine grained CoNiFeCrMn high-entropy alloys / Z. Han, W. Ren, J. Yang, A. Tian, Y. Du, G. Liu, R. Wei, G. Zhang, Y. Chen // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 816. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152583.

25. Insights into the phase diagram of the CrMnFeCoNi high entropy alloy / M. Laurent-Brocq, A. Akhatova, L. Perrière, S. Chebini, X. Sauvage, E. Leroy, Y. Champion // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 88. – P. 355–365. – DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.068.

26. Review of alloys developed using the entropy approach / Z. Bataeva, A. Ruktuev, I. Ivanov, A. Yurgin, I. Bataev // Metal Working and Material Science. – 2021. – Vol. 23, iss. 2. – P. 116–146. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

27. Zaddach A.J., Scattergood R.O., Koch C.C. Tensile properties of low-stacking fault energy high-entropy alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 636. – P. 373–378. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.

28. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтروпийного сплава Cantor / В.Е. Громов, Ю.А. Рубанникова, С.В. Коновалов, К.А. Осинцев, С.В. Воробьев // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2021. – Т. 64 (8). – С. 599–605. – DOI: 10.17073/0368-0797-2021-8-599-605.

29. Transformation-enhanced strength and ductility in a FeCoCrNiMn dual phase high-entropy alloy / T. Zhang, R.D. Zhao, F.F. Wu, S.B. Lin, S.S. Jiang, Y.J. Huang, S.H. Chen, J. Eckert // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 780. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139182.

30. Microstructure, phase formation and physical properties of AlCoCrFeNiMn high-entropy alloy / S.A. Uporov, R.E. Ryltsev, V.A. Bykov, S.K. Estemirova, D.A. Zamyatin // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 820. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153228.

31. Microstructures and mechanical properties of CoCrFeMnNiV high entropy alloy films / S. Fang, C. Wang, C.L. Li, J.H. Luan, Z.B. Jiao, C.T. Liu, C.H. Hsueh // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 820. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153388.

32. Fabrication and mechanical properties of TiC reinforced CoCrFeMnNi high-entropy alloy composite by water atomization and spark plasma sintering / D. Yim, P. Sathiyamoorthi, S.J. Hong, H.S. Kim // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 781. – P. 389–396. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.119.

33. Synergistic strengthening of FeCrNiCo high entropy alloys via micro-TiC and nano-SiC particles / L. Shen, Y. Zhao, Y. Li, H. Wu, H. Zhu, Z. Xie // Materials

Today Communications. – 2021. – Vol. 26. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101729.

34. Microstructural evolution and mechanical characterization of a WC-reinforced CoCrFeNi HEA matrix composite / S.W. Hussain, M.A. Mehmood, M.R.A. Karim, A. Godfrey, K. Yaqoob // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12, iss. 1. – P. 9822. – DOI: 10.1038/s41598-022-13649-5.

35. Microstructure and wear properties of TiN–Al₂O₃–Cr₂B multiphase ceramics in-situ reinforced CoCrFeMnNi high-entropy alloy coating / B. Zhang, Y. Yu, S. Zhu, Z. Zhang, X. Tao, Z. Wang, B. Lu // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 276. – P. 125352. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.125352.

36. Development and characterization of boride-reinforced CoCrFeNi composites / M.A. Mehmood,

M. Mujahid, A. Godfrey, M.F. Zafar, K. Yaqoob // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 947. – P. 169535. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169535.

37. Strengthening CoCrFeNi high-entropy alloy by Laves and boride phases / X. Chen, G. Qin, X. Gao, R. Chen, Q. Song, H. Cui // China Foundry. – 2022. – Vol. 19, iss. 6. – P. 457–463. – DOI: 10.1007/s41230-022-1007-4.

38. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere / A.A. Ruktuev, D.V. Lazurenko, T.S. Ogneva, R.I. Kuzmin, M.G. Golkovski, I.A. Bataev // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 448. – P. 128921. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Structure and properties of HEA-based coating reinforced with CrB particles

Alexey Ruktuev^{1, a, *}, Aleksandr Yurgin^{1, b}, Vladislav Shikalov^{2, c}, Arina Ukhina^{3, d}, Ivan Chakin^{4, e},
 Evgeny Domarov^{4, f}, Gleb Dovzhenko^{5, g}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Institute of solid state chemistry and mechanochemistry SB RAS, 18 Kutateladze str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁴ Budker Institute of nuclear physics SB RAS, 11 Lavrentyeva str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁵ SRF "SKIF", 1 Nikolsky Prospekt, Koltsovo, 630559, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-1325-1533>, ruktuev@corp.nstu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0473-7627>, yurgin2012@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>, v.shikalov@gmail.com, ^d <https://orcid.org/0000-0003-1878-0538>, auhina181@gmail.com,
^e <https://orcid.org/0000-0003-0529-2017>, chak_in2003@bk.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0003-2422-1513>, domarov88@mail.ru,
^g <https://orcid.org/0000-0003-0615-0643>, g.d.dovzhenko@srf-skif.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 April 2023

Revised: 25 April 2023

Accepted: 11 May 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Electron beam surfacing

Chromium boride

CoCrFeNiMn

High entropy alloy

Coating

Funding

This study was funded by Russian Science Foundation No. 22-79-00189, <https://rscf.ru/project/22-79-00189/>.

Acknowledgements

Structural investigations were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials"; wear resistance test was conducted at core facility "Mechanics".

ABSTRACT

Introduction. Currently, a new class of materials, namely high-entropy alloys, is an active area of research. One of the areas of its application is the fabrication of protective coatings with high performance properties. The high-entropy alloy of CoCrFeNiMn composition is characterized by high ductility, which is retained both at elevated and cryogenic temperatures, as well as high thermal stability and, thus, can be considered as promising materials for protective coatings formation. At the same time, its disadvantages are low hardness and strength. It is known that the reinforcement of the CoCrFeNiMn high-entropy alloy with hardening particles is an effective way to improve the mechanical properties of coatings. It is assumed that the addition of hardening boride particles affects positively on the mechanical characteristics of the alloy. The **aim of this work** is to study the structural and phase states and wear resistance of coatings based on a CoCrFeNiMn high-entropy alloy reinforced with CrB particles. Coatings obtained by the method of non-vacuum electron-beam surfacing of powder mixtures with different mass ratios of CoCrNiMn metal powders to the CrB powder (100:0, 95:5, 90:10, 80:20, 70:30) are studied in this work. To investigate the structure and phase composition of the coatings, such methods as optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis were applied. To study the elemental composition, energy-dispersive X-ray analysis was used. The mechanical properties were evaluated based on the microhardness measuring results. The wear resistance of the coatings was determined under conditions of dry sliding friction during reciprocating motion. **Results and discussion.** The addition of CrB powder to the surfacing mixture led to the formation of eutectic structures. When 5 wt. % CrB was added, a hypoeutectic structure is formed in the coating. An increase in the amount of CrB leads to the formation of coatings with a hypereutectic structure containing primary borides. The main phases found in the coatings are the fcc solid solution, and (Cr,Mn,Fe)₂B, (Ni,Co,Mn)₂B, CrB borides. All the studied coatings are characterized by an adhesive wear mechanism. The addition of 20 % and 30 % CrB to the surfacing mixture composition results in the wear resistance increase of the high-entropy alloy-based coatings by 3.6 and 6.1 times, respectively.

For citation: Ruktuev A.A., Yurgin A.B., Shikalov V.S., Ukhina A.V., Chakin I.K., Domarov E.V., Dovzhenko G.D. Structure and properties of HEA-based coating reinforced with CrB particles. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 87–103. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-87-103. (In Russian).

* Corresponding author

Ruktuev Alexey A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 (383) 346-06-12, **e-mail:** ruktuev@corp.nstu.ru

References

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, iss. 5, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Tsai M.H., Yeh J.W. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*, 2014, vol. 2, iss. 3, pp. 107–123. DOI: 10.1080/21663831.2014.912690.
4. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, iss. 8, pp. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
5. Steurer W. Single-phase high-entropy alloys – A critical update. *Materials Characterization*, 2020, vol. 162, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110179.
6. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 2014, vol. 61, pp. 1–93. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.
7. Duchaniya R.K., Pandel U., Rao P. Coatings based on high entropy alloys: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 4467–4473. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.720.
8. Li W., Liu P., Liaw P.K. Microstructures and properties of high-entropy alloy films and coatings: a review. *Materials Research Letters*, 2018, vol. 6, iss. 4, pp. 199–229. DOI: 10.1080/21663831.2018.1434248.
9. Jiang P.F., Zhang C.H., Zhang S., Zhang J.B., Chen J., Liu Y. Fabrication and wear behavior of TiC reinforced FeCoCrAlCu-based high entropy alloy coatings by laser surface alloying. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, vol. 255, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123571.
10. Guo Y., Li C., Zeng M., Wang J., Deng P., Wang Y. In-situ TiC reinforced CoCrCuFeNiSi_{0.2} high-entropy alloy coatings designed for enhanced wear performance by laser cladding. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, vol. 242, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122522.
11. Gu Z., Xi S., Sun C. Microstructure and properties of laser cladding and CoCr_{2.5}FeNi₂Ti_x high-entropy alloy composite coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 819, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152986.
12. Cheng J.B., Liang X.B., Wang Z.H., Xu B.S. Formation and mechanical properties of CoNiCuFeCr high-entropy alloys coatings prepared by plasma transferred arc cladding process. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2013, vol. 33, iss. 5, pp. 979–992. DOI: 10.1007/s11090-013-9469-1.
13. Hsu W.L., Murakami H., Yeh J.W., Yeh A.C., Shimoda K. On the study of thermal-sprayed Ni_{0.2}Co_{0.6}Fe_{0.2}CrSi_{0.2}AlTi_{0.2} HEA overlay coating. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 316, pp. 71–74. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.02.073.
14. Fadeev S.N., Golkovski M.G., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavruhin A.V., Petrov S.E., Salimov R.A., Vaisman A.F. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, vol. 57, iss. 3–6, pp. 653–655. DOI: 10.1016/S0969-806X(99)00499-5.
15. Uvarov N.F., Bushueva E., Turlo Y., Khamgushkeeva G. Influence of chromium concentration on corrosion resistance of surface layers of stainless steel. *MATEC Web of Conferences*, 2021, vol. 340, pp. 1–5. DOI: 10.1051/mateconf/202134001022.
16. Bushueva E.G., Grinberg B.E., Bataev V.A., Drobyaz E.A. Raising the resistance of chromium-nickel steel to hydroabrasive wear by non-vacuum electron-beam cladding with boron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2019, vol. 60, iss. 9–10, pp. 641–644. DOI: 10.1007/s11041-019-00331-3.
17. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovskii M.G., Bataev A.A., Samoilenko V.V., Plotnikova N.V. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 355, pp. 320–326. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.07.043.
18. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
19. Bataev I.A., Golkovskii M.G., Losinskaya A.A., Bataev A.A., Popelyukh A.I., Hassel T., Golovin D.D. Non-vacuum electron-beam carburizing and surface hardening of mild steel. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 322, pp. 6–14. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.09.137.
20. Lazurenko D.V., Alferova G.I., Golkovsky M.G., Emurlaev K.I., Emurlaeva Y.Y., Bataev I.A., Ogneva T.S., Ruktuev A.A., Stepanova N.V., Bataev A.A. Formation of wear-resistant copper-bearing layers on the surfaces of steel substrates by non-vacuum electron beam acladding using powder mixtures. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 395, p. 1–14. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125927.



21. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 120, pp. 1–36. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100754.
22. Mridha S., Das S., Aouadi S., Mukherjee S., Mishra R.S. Nanomechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society*, 2015, vol. 67, iss. 10, pp. 2296–2302. DOI: 10.1007/s11837-015-1566-6.
23. Zaddach A.J., Niu C., Koch C.C., Irving D.L. Mechanical properties and stacking fault energies of NiFeCrCoMn high-entropy alloy. *JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society*, 2013, vol. 65, iss. 12, pp. 1780–1789. DOI: 10.1007/s11837-013-0771-4.
24. Han Z., Ren W., Yang J., Tian A., Du Y., Liu G., Wei R., Zhang G., Chen Y. The corrosion behavior of ultra-fine grained CoNiFeCrMn high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 816, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152583.
25. Laurent-Brocq M., Akhatova A., Perrière L., Chebini S., Sauvage X., Leroy E., Champion Y. Insights into the phase diagram of the CrMnFeCoNi high entropy alloy. *Acta Materialia*, 2015, vol. 88, pp. 355–365. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.068.
26. Bataeva Z., Ruktuev A., Ivanov I., Yurgin A., Bataev I. Review of alloys developed using the entropy approach. *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, iss. 2, pp. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.
27. Zaddach A.J., Scattergood R.O., Koch C.C. Tensile properties of low-stacking fault energy high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 636, pp. 373–378. DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
28. Gromov V.E., Rubannikova Y.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor highentropy alloy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64 (8), pp. 599–605. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-8-599-605. (In Russian).
29. Zhang T., Zhao R.D., Wu F.F., Lin S.B., Jiang S.S., Huang Y.J., Chen S.H., Eckert J. Transformation-enhanced strength and ductility in a FeCoCrNiMn dual phase high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 780, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139182.
30. Uporov S.A., Ryltsev R.E., Bykov V.A., Estemirova S.K., Zamyatin D.A. Microstructure, phase formation and physical properties of AlCoCrFeNiMn high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 820, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153228.
31. Fang S., Wang C., Li C.L., Luan J.H., Jiao Z.B., Liu C.T., Hsueh C.H. Microstructures and mechanical properties of CoCrFeMnNiV high entropy alloy films. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 820, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153388.
32. Yim D., Sathiyamoorthi P., Hong S.J., Kim H.S. Fabrication and mechanical properties of TiC reinforced CoCrFeMnNi high-entropy alloy composite by water atomization and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 781, pp. 389–396. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.119.
33. Shen L., Zhao Y., Li Y., Wu H., Zhu H., Xie Z. Synergistic strengthening of FeCrNiCo high entropy alloys via micro-TiC and nano-SiC particles. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 26, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101729.
34. Hussain S.W., Mehmood M.A., Karim M.R.A., Godfrey A., Yaqoob K. Microstructural evolution and mechanical characterization of a WC-reinforced CoCrFeNi HEA matrix composite. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, iss. 1, p. 9822. DOI: 10.1038/s41598-022-13649-5.
35. Zhang B., Yu Y., Zhu S., Zhang Z., Tao X., Wang Z., Lu B. Microstructure and wear properties of TiN–Al₂O₃–Cr₂B multiphase ceramics in-situ reinforced CoCrFeMnNi high-entropy alloy coating. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 276, p. 125352. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.125352.
36. Mehmood M.A., Mujahid M., Godfrey A., Zafar M.F., Yaqoob K. Development and characterization of boride-reinforced CoCrFeNi composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 947, p. 169535. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169535.
37. Chen X., Qin G., Gao X., Chen R., Song Q., Cui H. Strengthening CoCrFeNi high-entropy alloy by Laves and boride phases. *China Foundry*, 2022, vol. 19, iss. 6, pp. 457–463. DOI: 10.1007/s41230-022-1007-4.
38. Ruktuev A.A., Lazurenko D.V., Ogneva T.S., Kuzmin R.I., Golkovski M.G., Bataev I.A. Structure and oxidation behavior of CoCrFeNiX (where X is Al, Cu, or Mn) coatings obtained by electron beam cladding in air atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 448, p. 128921. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128921.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование рассеяния энергии и жесткости сварных соединений стыковой сварки давлением

Анатолий Майтаков ^{a, *}, Алексей Грачев ^b, Анатолий Попов ^c, Сергей Ли ^d,
Надежда Ветрова ^e, Константин Плотников ^f

Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>,  may585417@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0009-0008-3997-5282>,  kafedra.mats@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>,  popov4116@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7174-2501>,  li@kemsu.ru,
^e  <https://orcid.org/0000-0002-7131-0511>,  veteroknadi@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0003-4145-0027>,  k.b.plotnikov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 691.175: 62-977

История статьи:

Поступила: 07 апреля 2023

Рецензирование: 15 апреля 2023

Принята к печати: 17 мая 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Сварной шов
Стыковая сварка
Непровар
Гистерезис
Рассеяние энергии

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При исследовании рассеяния энергии, связанной с внутренним трением в сварном шве, чрезвычайно важным является выбор методики измерения, так как от этого зависит надежность и достоверность получаемых данных. При этом необходимо исследовать изменение внутреннего трения в зависимости от наличия дефектов в сварном шве. Из неразрушающих методов для контроля соединений, полученных сваркой давлением, в настоящее время применяется только ультразвуковой контроль. Однако при этом не выявляются слабо окисленные непровары, которые удается обнаружить только при наличии сопровождающих их других дефектов. Соединения разнородных материалов ультразвуком не контролируются, поэтому разработка неразрушающих методов контроля таких соединений является весьма актуальной. **Цель работы:** создание процедуры тестирования качества сварного соединения в металлах и сплавах, которая будет быстрой и простой альтернативой известным методам неразрушающего контроля, за счет измерения рассеяния энергии в сварном шве образца методом статической петли гистерезиса. **В работе исследованы** образцы, полученные на машине сварки трением и на машине стыковой контактной сварки. Исследования осуществлялись на соединениях однородных сталей *сталь 45 + сталь 45* и разнородных *сталь 45 + сталь Р6М5*. **Метод исследования:** неразрушающий контроль качества сварного соединения в металлах и сплавах за счет измерения рассеивания энергии в сварном шве образца методом статической петли гистерезиса. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что с увеличением непровара в сварном шве рассеяние энергии возрастает при одинаковых значениях амплитуды крутящего момента в условиях статического нагружения. Жесткость качественно сваренных соединений остается постоянной, а жесткость соединений с непроваром уменьшается с увеличением амплитуды крутящего момента. Связь прочности с жесткостью и демпфирующей способностью, полученная методом статической петли гистерезиса, сохраняется для различных структурных состояний материала образцов.

Для цитирования: Исследование рассеяния энергии и жесткости сварных соединений стыковой сварки давлением / А.Л. Майтаков, А.В. Грачев, А.М. Попов, С.Р. Ли, Н.Т. Ветрова, К.Б. Плотников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 104–116. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-104-116.

Введение

При рассеянии энергии, связанной с внутренним трением, чрезвычайно важным является выбор методики измерения, так как от этого часто зависит надежность и достоверность экспериментальных данных. Измерения в металлах

и сплавах выполняются с двумя целями. С одной стороны, стремятся определить абсолютные значения внутреннего трения, а с другой – проводят измерения для получения величин, связанных с изменением состояния твердого тела или с различием между разными его состояниями. В настоящей работе исследуется изменение внутреннего трения в сварных образцах в зависимости от наличия дефектов в сварном шве, поэтому первостепенный интерес представляет измерение не только абсолютных величин внутреннего трения, но и их изменений, причем чувствитель-

*Адрес для переписки

Майтаков Анатолий Леонидович, д.т.н., профессор
Кемеровский государственный университет,
ул. Красная, 6,
650000, г. Кемерово, Россия
Тел.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: may585417@mail.ru

ность аппаратуры к таким изменениям должна быть достаточной высокой. При этом особое внимание должно быть обращено на снижение трудоемкости измерений.

Энергетический метод может быть применен для исследования рассеяния энергии в таких материалах, для которых соответствующим подбором химического состава и термической обработки можно получить образцы, обладающие практически одинаковыми удельным весом и упругими свойствами, но имеющие большую разницу в способности рассеяния энергии при колебаниях. Этот метод требует регистрации амплитуды установившихся колебаний образца, что в условиях производства представляет значительные трудности [1]. Относительное рассеяние энергии в материале исследуемого образца при его колебаниях определяется расчетом по данным измерений на специальной установке.

Применение метода динамической петли гистерезиса нецелесообразно из-за низкой чувствительности аппаратуры для измерения динамических деформаций.

Метод кривой резонанса используют при малых уровнях деформаций, когда необратимые потери невелики и колебательную систему можно считать практически линейной [2–5]. В работе [6] рассмотрено применение этого метода при любой нелинейности амплитудной зависимости рассеяния энергии. При высокой добротности системы чувствительность метода к изменению внутреннего трения является очень низкой, что не позволяет применять этот метод для выявления дефектов сварного соединения.

Использовать зависимость резонансной частоты системы от уровня необратимых потерь энергии в материале упругого элемента в данном случае также нельзя, поскольку на изменение резонансной частоты большее влияние будут оказывать отклонения в размерах образцов, чем наличие дефекта в сварном шве.

Из неразрушающих методов для контроля стыковых соединений, полученных сваркой давлением, в настоящее время применяется только ультразвуковой контроль. При этом на результаты контроля большое влияние оказывает неоднородность внутренней структуры, не выявляются слабо окисленные непровары, которые удается обнаружить только при наличии сопровождающих их других дефектов [5]. Соединения

разноименных материалов вообще ультразвуком не контролируются [16], поэтому разработка неразрушающих методов контроля таких соединений является весьма актуальной.

В настоящей работе внутреннее трение определяется методом статической петли гистерезиса образца. Применение метода статической петли гистерезиса обусловлено тем, что он позволяет определить рассеяние энергии практически непосредственно в сварном шве. С целью получения положительных результатов могут быть использованы чувствительные устройства [7, 8] для регистрации малых перемещений. Измерение рассеяния энергии методом статической петли гистерезиса в этом случае осуществляется при нагружении сварного соединения знакопеременным крутящим моментом.

Работоспособность соединений зависит от их прочности, жесткости и демпфирующей способности, а присутствие непроваров в сварном соединении увеличивает рассеяние энергии и уменьшает прочность. Несмотря на широкое применение стыковой сварки давлением, до сих пор не существует надежных способов выявления основного дефекта этих соединений – слабо окисленного непровара.

Цель исследования состоит в том, чтобы создать процедуру тестирования качества сварного соединения в металлах и сплавах, которая будет быстрой и простой альтернативой известным методам неразрушающего контроля, за счет измерения рассеяния энергии в сварном шве образца методом статической петли гистерезиса.

Методика исследований

Для проведения исследований были изготовлены образцы на машине МФ-327 сваркой трением и на машине МСР-30 стыковой контактной сваркой. Сварка трением и стыковая контактная сварка были выбраны как наиболее широко применяемые в промышленности, а также потому, что особенности соединений, выполненных стыковой сваркой давлением, наиболее полно объединены в соединениях, полученных этими видами сварки [9–10]. Исследования осуществлялись на соединениях однородных сталей *сталь 45 + сталь 45* и разнородных *сталь 45 + сталь Р6М5*. Выбор материалов образцов обусловлен широким их применением в промыш-

ленности. Режимы сварки заготовок диаметром 25 мм приведены в табл. 1 для соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + сталь Р6М5*, полученных контактной сваркой. Для композиции *сталь 45 + сталь 45* время нагрева варьировалось в пределах 15 с, в то время как продолжительность нагрева разнородных образцов *сталь 45 + сталь Р6М5* возрастала до 25 с.

В табл. 2 показаны режимы для соединений *сталь 45 + Р6М5* и *сталь 45 + сталь 45*, полученных трением.

После сварки все заготовки, а также заготовки из цельного прутка стали 45 и стали Р6М5 подвергались отжигу при 850 °С в течение 10 ч. Для обеспечения однородности размеров по

диаметру образцы протачивались на токарном станке. Диаметр образцов в месте сварки составил 17,2 ± 0,05 мм, а их длина – 170 мм. Лапки образцов сострагивались без последующей механической обработки.

Как уже упоминалось во введении, внутреннее трение определялось методом статической петли гистерезиса, что позволило измерить рассеяние энергии практически непосредственно в сварном шве [1, 3–15]. Исследования выполнялись на испытательной машине КМ-50-1, предназначенной для испытания образцов из металлов на кручение. Измерение рассеяния энергии методом статической петли гистерезиса осуществлялось при нагружении сварного соеди-

Таблица 1

Table 1

Режимы контактной сварки заготовок для соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + сталь Р6М5*

Modes of resistance welding of blank pairs *steel 45 + steel 45* and *steel 45 + steel R6M5*

№ режима	Суммарная осадка, мм	Вторичное напряжение, В	Время нагрева, с
1	2	3,5	15...25
2	3	3,5	15...25
3	4	3,5	15...25
4	5	3,5	15...25
5	6	3,5	15...25
6	10	3,5	15...25

Таблица 2

Table 2

Режимы сварки трением для соединений *сталь 45 + Р6М5* и *сталь 45 + сталь 45*

Modes of friction welding of blank pairs *steel 45 + steel R6M5* and *steel 45 + steel 45*

№ режима	Частота вращения, об/мин	Удельное давление нагрева, Н/мм ²	Удельное давление проковки, Н/мм ²	Время нагрева, с
1	1500	156	236	2
2	1500	156	236	8
3	1500	156	236	9
4	1500	156	236	12
5	1500	156	236	15
6	1500	156	236	25
7	1500	156	236	30
8	1500	27	27	3
9	1500	27	27	5
10	1500	60	60	5
11	1500	60	60	10
12	1500	100	100	6
13	1500	160	160	5
14	1500	170	170	10

нения знакопеременным крутящим моментом, а перемещения фиксировались лазерным датчиком с цифровой индексацией LАН-G и разрешением 0,5 мкм.

Снятие показаний индикатора производилось после нескольких циклов предварительного нагружения, что соответствовало замыканию петли гистерезиса. После снятия петли при одной амплитуде знакопеременного крутящего момента цикл нагружения производился уже при большей амплитуде момента, для которой также строилась петля гистерезиса и т. д. Нагружение сварного соединения крутящим моментом производилось только в упругой области деформирования всего образца. Диссипация энергии в зоне сварки при приложении знакопеременного момента больше статического предварительного смещения похожа по своему характеру на пластическую деформацию [6]. Микротрение приводит к поглощению энергии контактом – гистерезису. Гистерезисные потери в сварном соединении определялись площадью петли (рис. 1).

В качестве меры внутреннего трения могут быть выбраны различные величины независимо от источников энергетических потерь. Наиболее часто используется коэффициент поглощения $\psi = \Delta W / W$, где ΔW – необратимо рассеянная энергия за один цикл нагружения в следующих координатах: крутящий момент $T_{кр}$ и соответствующее перемещение φ . Амплитудное значение потенциальной энергии характеризуется площадью треугольника OAB (рис. 1).

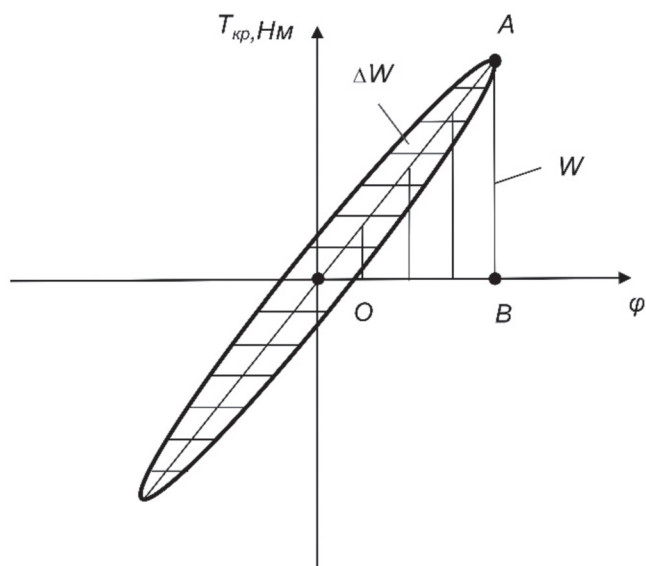


Рис. 1. Гистерезисные потери в сварном соединении
Fig. 1. Hysteresis losses in a welded joint

Рассеяние энергии, определяемое методом статической петли гистерезиса, представляет собой сумму потерь для соединений *сталь 45 + сталь 45* и описывается зависимостью $W = 2W_1 + W_3$, а для образцов *сталь 45 + сталь Р6М5* – зависимостью $W = 2W_1 + W_2 + W_3$. В этих зависимостях W_1 и W_2 характеризуют рассеяние энергии в объеме основного металла стали 45 и Р6М5 соответственно, заключенном между сварным швом и ножом датчика, а W_3 – рассеяние энергии в сварном шве [4, 6, 12].

Отсюда следует, что для получения рассеяния энергии W в сварном шве необходимо из общего рассеяния энергии вычесть рассеяние энергии в основном материале.

Коэффициент поглощения сварного шва определяется также вычитанием из общего коэффициента поглощения потерь в основном материале.

Жесткость C представляется в настоящей работе как жесткость части образца, заключенной между ножами датчиков.

Результаты и их обсуждение

Проводилось изучение влияния базы измерения l на рассматриваемые параметры на отожженных образцах. Рассеяние энергии в материале образцов при знакопеременном нагружении крутящим моментом возрастает прямо пропорционально расстоянию между ножами датчиков при его увеличении от 2 до 6 мм (рис. 2). Линии 1, 2, 4 характеризуют рассеяние энергии в стали Р6М5 при амплитудных значениях крутящего

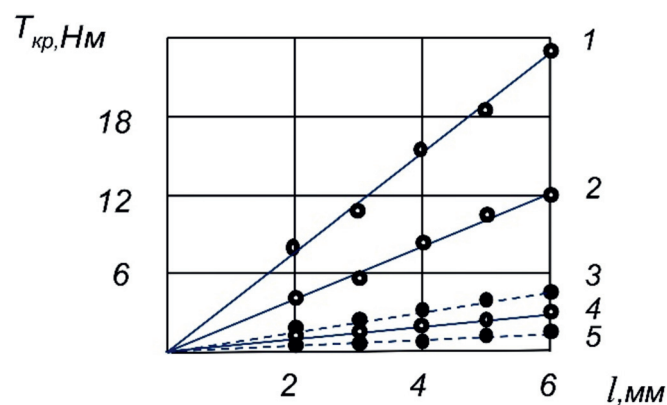


Рис. 2. Влияние базы измерения l на рассеяние энергии при различных значениях крутящего момента
Fig. 2. Dependence of energy dissipation on the gauge length l at various torque values

момента $T_{кр}$, равных 196, 176,4 и 137,2 Нм. Линии 3, 5 обозначают рассеяние энергии в стали 45 при амплитудных значениях крутящего момента 196 и 176,4 Нм. Увеличение рассеяния энергии обусловлено возрастанием объема материала образца, в котором производится измерение. Возрастание объема происходит за счет увеличения длины при постоянстве диаметра.

Коэффициент поглощения, являющийся относительной характеристикой, с увеличением базы измерения остается постоянным как для стали 45 ($\varphi = 0,05$), так и для стали Р6М5 ($\varphi = 0,6$). Измерения проводились при амплитуде крутящего момента 176,4 Нм. Измеряемое значение жесткости уменьшается с увеличением расстояния между сечениями установки ножей датчиков (рис. 3). Зависимости получены для стали 45 (линия 1) и стали Р6М5 (линия 2) при амплитуде крутящего момента 176,4 Нм.

$C \cdot 10^5, \text{Нм/рад}$

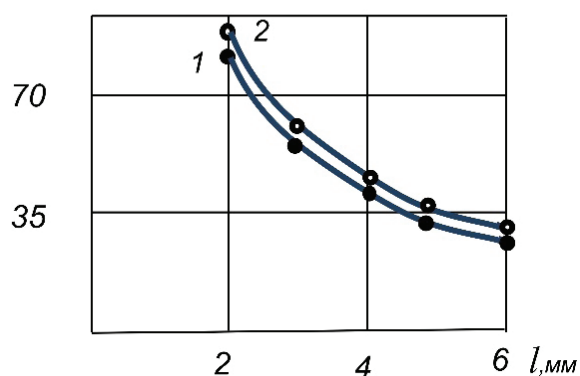


Рис. 3. Зависимость показаний измерения жесткости от базы измерения l

Fig. 3. Dependence of stiffness on the gauge length l

Уменьшение жесткости связано с тем, что с увеличением расстояния между сечениями установки ножей датчиков при постоянном крутящем моменте $T_{кр}$ угол поворота сечений φ (рис. 1) относительно друг друга увеличивается. При значительном увеличении базы измерения эта зависимость становится все более выпуклой.

При изменении значения крутящего момента рассеяние энергии в сварных швах также изменяется. На рис. 4 и 5 приведены амплитудные зависимости рассеяния энергии в сварных швах соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + Р6М5* соответственно, а также в цельных образ-

$\omega \cdot 10^{-3}, \text{Нм} \cdot \text{рад}$

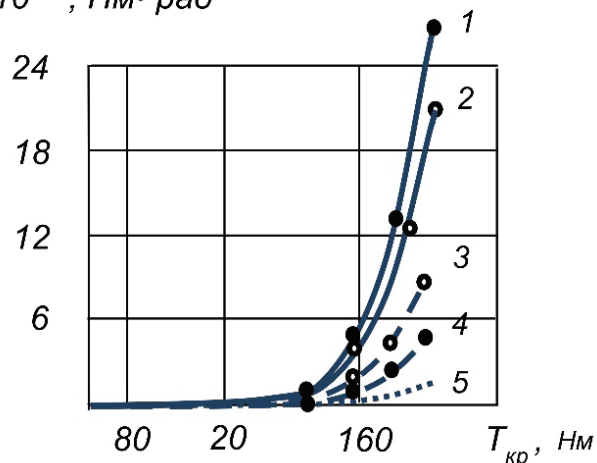


Рис. 4. Амплитудная зависимость рассеяния энергии в сварных швах соединений *сталь 45 + сталь 45*

Fig. 4. Amplitude dependence of energy dissipation in welded joints of steel 45 + steel 45

$\omega \cdot 10^{-3}, \text{Нм} \cdot \text{рад}$

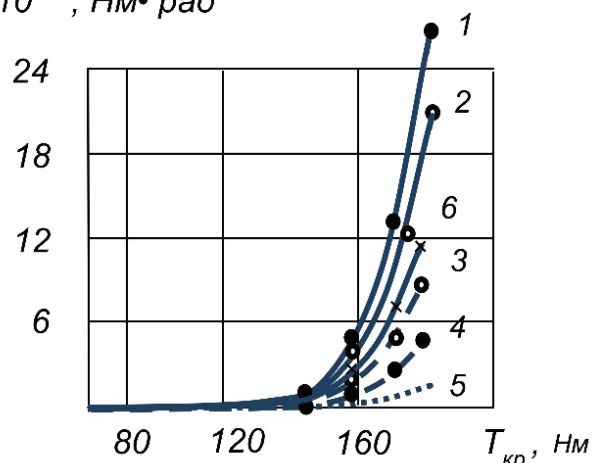


Рис. 5. Амплитудная зависимость рассеяния энергии в сварных швах соединений *сталь 45 + Р6М5*

Fig. 5. Amplitude dependence of energy dissipation in welded joints of steel 45 + steel Р6М5

цах из этих сталей. Обозначения на рисунках: 2, 3 – соединения, полученные сваркой трением; 1, 4 – полученные контактной сваркой; 5, 6 – цельные образцы соответственно из стали 45 и стали Р6М5.

Показанное на рис. 4 и 5 рассеяние энергии в стали 45 и стали Р6М5 при знакопеременном нагружении образцов в упругой области происходит за счет локальной микропластической деформации отдельных перенапряженных участков зерен. Перенапряжения участков зерен возникают вследствие анизотропии модуля упругости [4, 17]. Межзёренным смещениям

принадлежит второстепенная роль, поскольку основным механизмом пластической деформации являются внутризёрненные сдвиги [17].

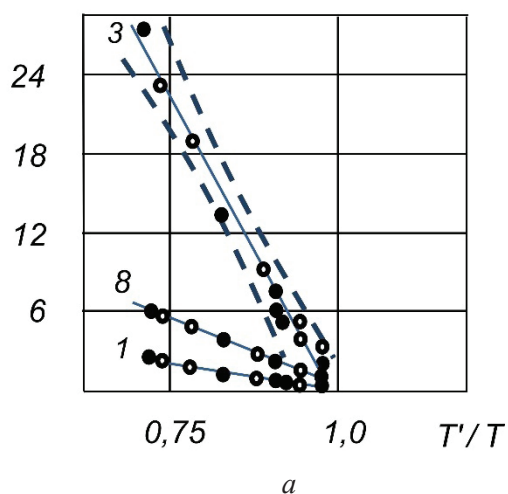
В сварных швах подавляющая часть рассеиваемой энергии приходится на непрочвар, который согласно [7, 18] можно представить как плотностный механический контакт. Во время знакопеременных нагружений контакта тангенциальной силой в нем происходит предварительное смещение во взаимно противоположных направлениях [16]. При этом осуществляются пластическая и упругая деформации сдвига микровыступов шероховатой поверхности. В процессе пластической деформации при микросмещении, когда оно происходит первично, материал, упрочняясь, повышает свой предел упругости. Повторное смещение после разгрузки совершается в пределах упругости, но с участием микротрения, поэтому деформация и принимает упругофрикционный характер, сходный с характером пластической деформации. Помимо деформации элементов контакта имеет место их скольжение. В это скольжение они вступают не все сразу, а последовательно один за другим. Это обусловлено тем, что микровыступы увлекаются в сдвиг микротрением на площадках касания элементов, сжатых по-разному. Кроме того, жесткость микровыступов различна.

По аналогии со сдвиговой прочностью контакта сварные швы с различной вели-

чиной непрочвара рассеивают энергию по-разному. Чем больше непрочвар, тем больше энергии рассеивается в сварном шве. Это объясняется, во-первых, тем, что в большем по площади контакте деформируется большее количество микровыступов и большее количество элементов контакта проскальзывает. Во-вторых, непрочвар уменьшает полярный момент сопротивления сечения, а это приводит к возникновению бо́льших касательных напряжений в тех сварных швах, которые имеют бо́льший непрочвар, при нагружении всех соединений равным крутящим моментом. Бо́льшее касательное напряжение вызывает бо́льшее микросмещение, что приводит к увеличению рассеяния энергии в сварном шве. С увеличением амплитуды нагружения растет и разница в энергии, рассеянной в швах с различной величиной непрочвара.

Связь рассеяния энергии с относительной прочностью соединений для различных амплитуд крутящего момента оказалась удовлетворительной (рис. 6). Линии 1, 2, 3 соответствуют амплитудам 147, 156,8 и 176,4 Нм; «○» – соединения, полученные сваркой трением; «●» – полученные контактной сваркой. По оси абсцисс отложено отношение разрушающего момента образца к разрушающему моменту образца из отожженной стали 45. Такое обозначение принято на всех рисунках.

$\omega \cdot 10^{-3}, \text{ Нм} \cdot \text{рад}$



$\omega \cdot 10^{-3}, \text{ Нм} \cdot \text{рад}$

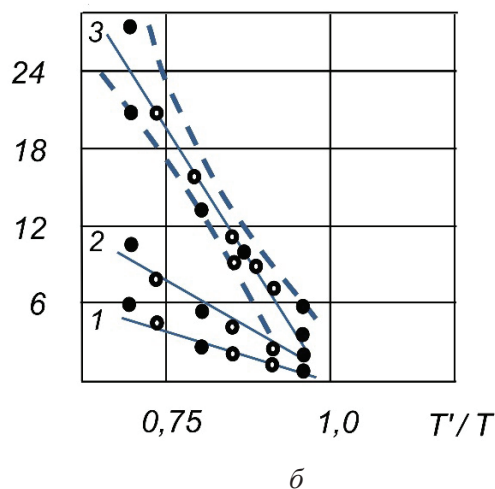


Рис. 6. Связь рассеяния энергии с относительной прочностью соединения:
а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + Р6М5 для различных амплитудных значений крутящего момента

Fig. 6. Relation between energy dissipation and relative strength of welded joints:

а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + R6M5 for different torque amplitudes

Зависимость коэффициента поглощения от амплитуды нагружения (рис. 7) аналогична зависимости рассеяния энергии. Линии 2, 3 обозначают соединения, полученные сваркой трением; 1, 4 – полученные контактной сваркой; линии 5 обозначают сплошные образцы из стали 45 (рис. 7, а) и стали Р6М5 (рис. 7, б). Связь относительной прочности соединений с коэффициентом поглощения сварных швов представлена на рис. 8. Обозначения аналогичны рис. 6.

С увеличением амплитуды нагружения жесткость образцов из стали 45 и Р6М5, а также сварных образцов, не имеющих непровара, остается постоянной (рис. 9). Линия 2 обозначает соединения, полученные сваркой трением; 1, 3 – полученные контактной сваркой; 4, 5 – сплошные образцы из стали 45 и Р6М5.

Постоянство жесткости объясняется прямой пропорциональной зависимостью деформации от нагрузки при нагружении образца в упругой

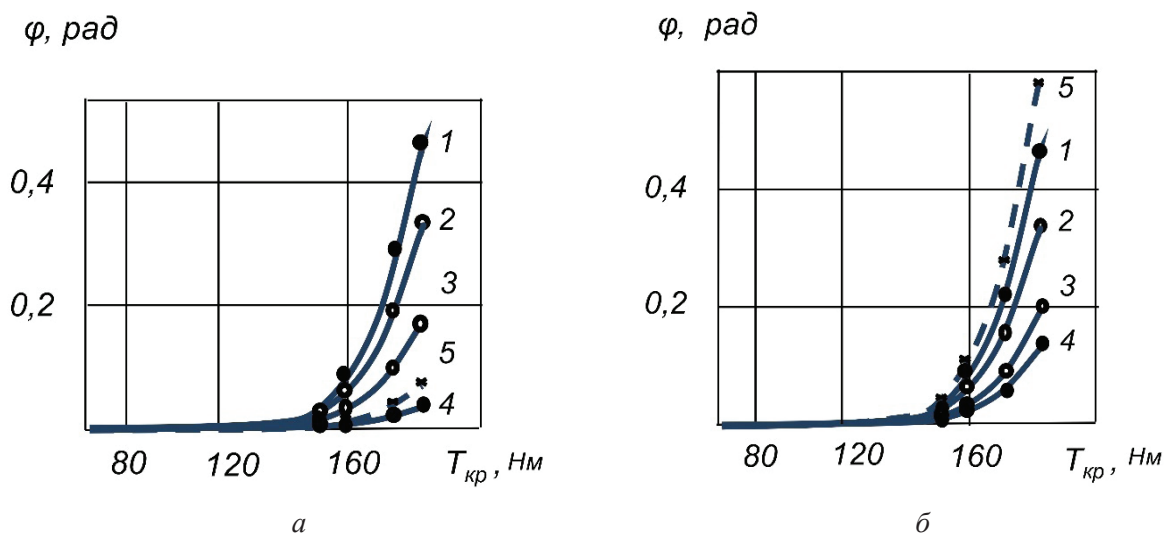


Рис. 7. Амплитудная зависимость коэффициента поглощения для сварных швов соединений: а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + Р6М5

Fig. 7. Amplitude dependence of the absorption coefficient for welded joints: а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + steel R6M5

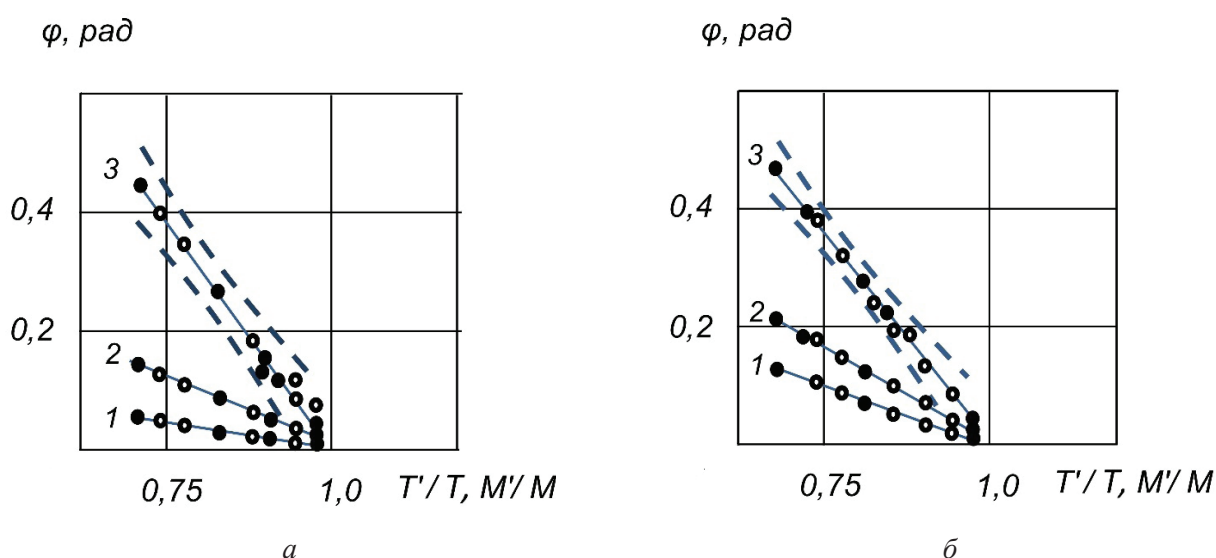


Рис. 8. Связь коэффициента поглощения с относительной прочностью соединения: а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + сталь Р6М5 для различных амплитуд крутящего момента

Fig. 8. Relation between the absorption coefficient and relative strength of the joint: а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + steel R6M5 for different torque amplitudes

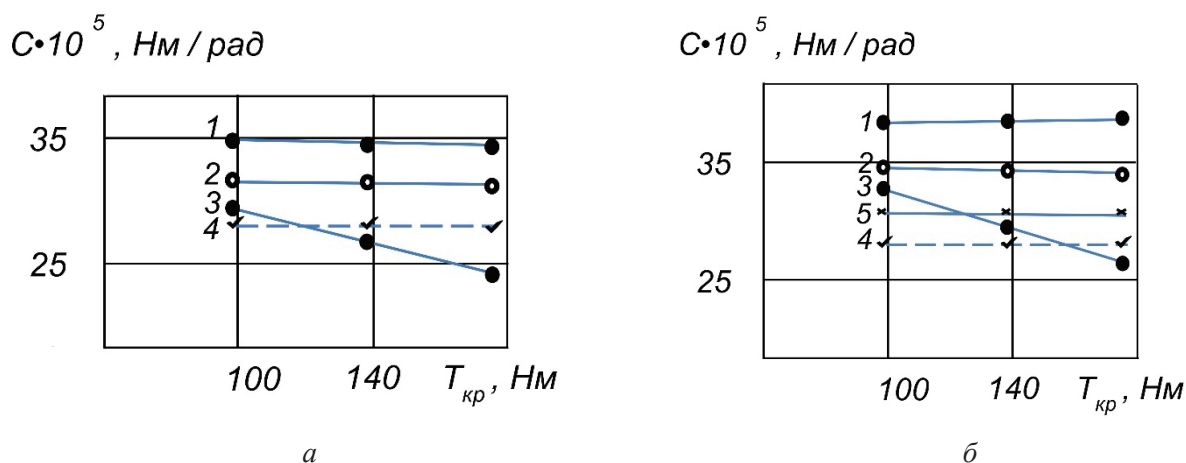


Рис. 9. Амплитудная зависимость жесткости сварных соединений:

a – сталь 45 + сталь 45; *б* – сталь 45 + сталь P6M5

Fig. 9. Amplitude dependence of stiffness of welded joints:

a – steel 45 + steel 45; *б* – steel 45 + steel R6M5

области. Жесткость соединений, имеющих не-
провар, с увеличением амплитуды нагружения
уменьшается за счет деформации микровыступов
шероховатой поверхности и скольжения эле-
ментов контакта. В общем случае зависимость
жесткости сварных соединений от амплитуды
является нелинейной [2, 3, 9].

При малых амплитудах нагружения жест-
кость образцов из стали 45 и P6M5 может ока-
заться меньше жесткости сварных соединений,
которые имеют непровар. Это объясняется тер-
момеханическим упрочнением материала около-
шовной зоны в процессе сварки. Последующий

отжиг полностью не устраняет воздействие цик-
ла сварки.

Связь жесткости сварных соединений с отно-
сительной прочностью приведена на рис. 10. За-
висимости построены при амплитуде крутящего
момента $T = 137,2$ Нм. Штриховыми линиями
указана 96%-я доверительная область для тео-
ретической линии регрессии. Аналогичная об-
ласть строится на всех графиках.

На основании рассмотренных выше экспе-
риментальных исследований предлагаются не-
разрушающие методы определения прочности
стыковых соединений, полученных сваркой дав-

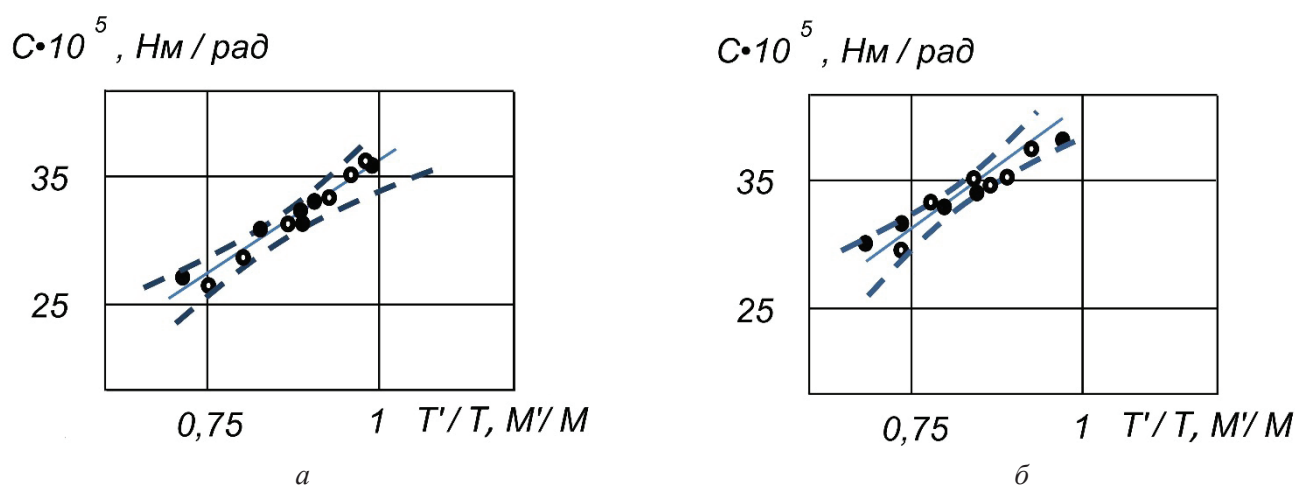


Рис. 10. Связь жесткости сварных соединений с относительной прочностью:

a – сталь 45 + сталь 45; *б* – сталь 45 + сталь P6M5

Fig. 10. Relation between rigidity and relative strength of welded joints:

a – steel 45 + steel 45; *б* – steel 45 + steel R6M5

лением, по их жесткости и демпфирующей способности [9, 15, 16]. Эти методы основаны на предпосылке, рассматривающей непровар как механический контакт двух твердых тел, который обладает повышенными демпфирующими свойствами. Контроль соединений предлагается осуществлять методом статической петли гистерезиса.

При статическом методе контроля характеристиками для оценки прочности сварных соединений являются коэффициент поглощения, рассеяние энергии и жесткость соединений. По этому методу строятся амплитудные зависимости рассматриваемых характеристик для партии соединений, сваренных на разных режимах. Затем производят разрушение соединений. Далее устанавливается соответствие каждой кривой амплитудной зависимости определенной прочности. По этим данным строятся графики зависимости коэффициента поглощения, рассеяния энергии или жесткости от прочности соединений для определенных амплитуд крутящего момента (рис. 6–8). Эти зависимости и являются основными тарифовочными графиками по определению прочности соединений. Зная рассеяние энергии, коэффициент поглощения или жесткость соединений при определенной амплитуде нагружения, определяют их прочность.

Выбор контролируемых характеристик соединений зависит от конкретных условий. Если

нельзя выдержать точно расстояние между ножами датчиков, то прочность лучше оценивать по коэффициенту поглощения, который не зависит от базы измерения. Если не четко фиксируется амплитуда нагружения, то прочность соединений лучше определять по их жесткости. Кроме того, жесткость соединений изменяется от наличия в них пор, которые уменьшают поперечное сечение, а коэффициент поглощения при этом практически не меняется. Контроль соединений по рассеянию энергии, коэффициенту поглощения и их жесткости связан с большой трудоемкостью обработки опытных данных. Трудоемкость можно уменьшить, если рассеяние энергии оценивать по ширине петли гистерезиса (рис. 11).

Действительно, площадь петли W можно приближенно представить как площадь двух треугольников с основанием φ_c – шириной петли в радианах и высотой петли – амплитудой закручивающего момента T_c (Нм).

При одном крутящем моменте для всех образцов рассеяние энергии будет пропорционально ширине петли.

Связь прочности отоженных образцов на кручение с шириной петли механического гистерезиса при амплитуде крутящего момента 176,4 Нм показана на рис. 12, где a и b – образцы из стали 45 и Р6М5; «○» и «●» – соответственно соединения, полученные сваркой трением и контактной сваркой. При контроле методом ста-

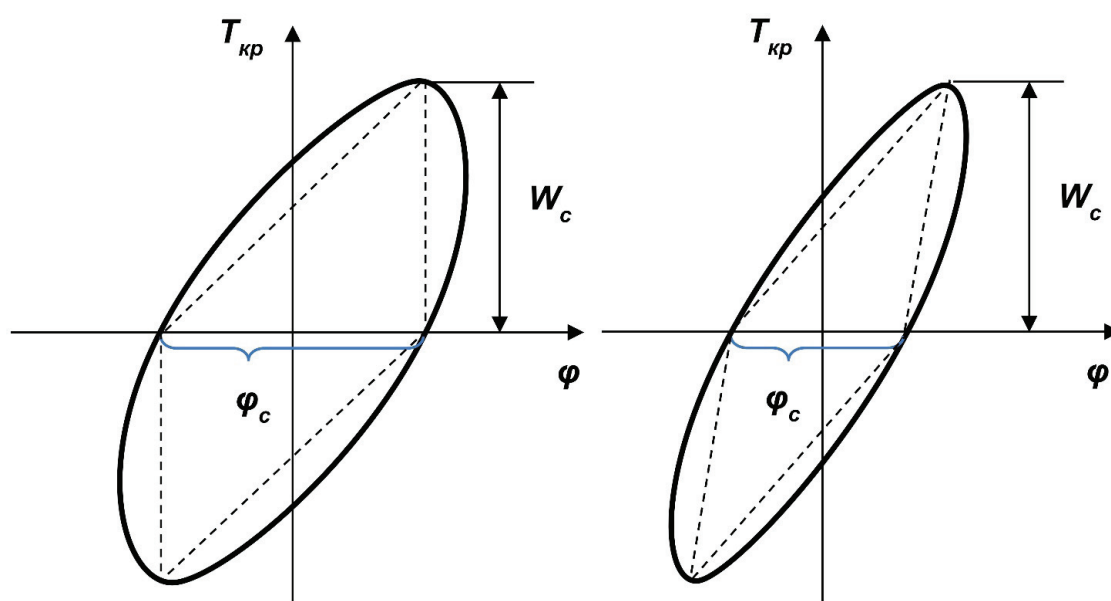


Рис. 11. Петли механического гистерезиса для образцов с различной прочностью

Fig. 11. Mechanical hysteresis loops for specimens with different strengths

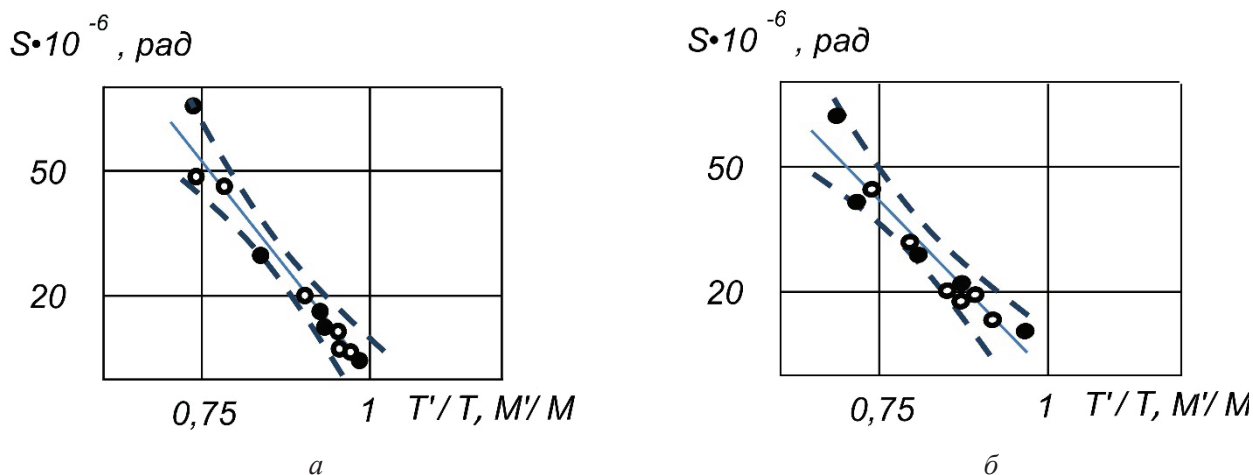


Рис. 12. Связь ширины петли механического гистерезиса с относительной прочностью на кручение для отожженных соединений:

a – сталь 45 + сталь 45; *б* – сталь 45 + сталь Р6М5

Fig. 12. Relation between the mechanical hysteresis loop width and relative torsional strength for annealed joints:

a – steel 45 + steel 45; *б* – steel 45 + steel R6M5

тической петли гистерезиса для ее замыкания необходимо произвести несколько циклов предварительного нагружения при закручивании, а при изгибных колебаниях – получается автоматически.

С целью выяснения влияния структуры материалов на качество сварного шва были проведены металлографические исследования соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + сталь Р6М5*. Металлографический анализ проводился с помощью инструментальных микроскопов при увеличении $\times 400$. Травление микрошлифов – стандартное для данных сталей.

Образцы подвергались различным видам термообработки, моделирующим условия формирования структуры сварного шва (температуру и длительность нагрева при сварке, интенсивность охлаждения и др.). Полученные данные позволили уточнить технологические параметры стыковой сварки, а также сварки трением: время нагрева и др. (табл. 1, 2).

Выводы

Установлено, что с увеличением непровара в сварном шве рассеяние энергии возрастает при одинаковых значениях амплитуды крутящего момента в условиях статического нагружения. Выявлено, что жесткость качественно сваренных соединений остается постоянной, а жест-

кость соединений с непроваром уменьшается с увеличением амплитуды крутящего момента.

Применение метода статической петли гистерезиса помогло установить связь жесткости и демпфирующей способности сварных соединений с их прочностью, что позволяет использовать данный метод как способ неразрушающего контроля для оценки качества стыковых соединений, полученных сваркой давлением.

Список литературы

1. Leenen R. The modelling and identification of an hysteretic system. The wire-rope as a nonlinear shock vibration isolator / Department of Mechanical Engineering Eindhoven University of Technology. – Technische Universiteit Eindhoven, 2012. – 45 p.
2. Головин И.С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 247 с. – ISBN 978-5-87623-638-8.
3. Danilin A.N., Shalashilin V.I. A method to identify hysteresis by an example of an antigalloping device // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46. – P. 588–595. – DOI: 10.1007/s10778-010-0345-x.
4. Esteban J., Rogers C.A. Energy dissipation through joints // Computers & Structures. – 2000. – Vol. 75 (4). – P. 347–359. – DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00096-6.
5. Динамика температурного поля и оценка технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических пластин / Р.А. Рзаев, А.У. Джалмухамбетов, В.В. Смирнов, Ш.М. Атуев //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1 (2). – С. 274–278.

6. Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation / Z. Zhang, M. Liu, Z. Su, Y. Xiao // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – P. 156–170. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.07.001.

7. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 887–894.

8. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Сухорада А.Е. Исследование тепловложения и температурных полей при сварке трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2017. – № 3 (32). – С. 150–155. – DOI: 10.5281/zenodo.897023.

9. Никулина А.А. Структура и свойства разнородных соединений, полученных методами сварки и наплавки углеродистых и легированных сталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Новосибирск, 2020. – 37 с.

10. Левихина А.В., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А. Мониторинг образования несплошностей методом акустической эмиссии в процессе сварки трением с перемешиванием // Известия Алтайского государственного университета. – 2017. – № 4 (96). – С. 39–44. – DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-06.

11. Околович Г.А. Металловедение инструментального производства. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2020. – 242 с. – ISBN 978-5-7568-1326-5.

12. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием / Е.В. Кривонос, И.К. Черных, Е.Н. Матушко, Е.В. Васильев // Омский научный вестник. – 2017. – № 2 (152). – С. 24–27.

13. Получение сварного соединения пластин из титановых сплавов методом сварки трением с перемешиванием / И.К. Черных, Е.В. Васильев, И.Л. Че-

калин, Е.В. Кривонос, Д.С. Макашин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 198–207. – DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-198-207.

14. Способы повышения качества швов, полученных при помощи сварки трением с перемешиванием / И.Л. Чекалин, И.К. Черных, Е.В. Кривонос, Е.В. Васильев // Омский научный вестник. – 2017. – № 5 (155). – С. 43–46.

15. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding // Wear. – 2010. – Vol. 268, N 1–2. – P. 59–66. – DOI: 10.1016/j.wear.2009.06.027.

16. Wolf A., Lafarge R., Brosius A. A non-destructive testing method for joints by the measurement of the energy dissipation // Production Engineering: Research and Development. – 2019. – Vol. 13. – P. 99–106. – DOI: 10.1007/s11740-018-0860-x.

17. Кульков В.Г., Сыщиков А.А. Внутреннее трение на границах зерен, содержащих протяженные поры // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45, № 3. – С. 23–25. – DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47267.17580.

18. Курицын Д.И. Сварка трением перемешиванием: исследование влияния технологических факторов процесса на качество соединений, разработка средств оснащения: монография. – Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 162 с. – ISBN 978-3-659-39314-3.

19. Evaluation of fatigue strength based on dissipated energy for laser welds / Y. Ogawa, T. Horita, N. Iwatani, K. Kadoi, D. Shiozawa, T. Sakagami // Engineering Proceedings. – 2021. – Vol. 8. – P. 6–12. – DOI: 10.3390/engproc2021008006.

20. Energy dissipation mechanism of inerter systems / Z. Zhao, Q. Chen, R. Zhang, C. Pan, Y. Jiang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2020. – Vol. 184. – P. 105845. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105845.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Study of energy dissipation and rigidity of welded joints obtained by pressure butt welding

Anatoly Maytakov ^{a, *}, Alexey Grachev ^b, Anatoly Popov ^c, Sergey Li ^d,
 Nadezhda Vetrova ^e, Konstantin Plotnikov ^f

Kemerovo State University, 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>,  may585417@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0009-0008-3997-5282>,  kafedra.mats@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>,  popov4116@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7174-2501>,  li@kemsu.ru,
^e  <https://orcid.org/0000-0002-7131-0511>,  veteroknadi@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0003-4145-0027>,  k.b.plotnikov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 April 2023

Revised: 15 April 2023

Accepted: 17 May 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Weld seam

Butt welding

Lack of welding penetration

Hysteresis

Energy dissipation

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. When studying the energy dissipation associated with internal friction in a weld, it is extremely important to choose a measurement technique, since the reliability and integrity of the data obtained depends on it. At the same time, it is necessary to investigate the change in internal friction depending on the presence of defects in the weld. Of the variety of methods for non-destructive testing of joints obtained by pressure welding, only ultrasonic is currently used. However, lightly oxidized lacks of welding penetration are not detected, which can be detected only in the presence of other defects accompanying it. Compounds of dissimilar materials are not controlled by ultrasound at all. Therefore, the development of non-destructive testing methods for such compounds is very relevant. **The purpose of the work:** to find a procedure for testing the quality of a welded joint in metals and alloys that will be a quick and simple alternative to the known methods of non-destructive testing, by measuring the energy dissipation in the weld of the sample by the static hysteresis loop method. **The method of investigation** is non-destructive quality control of the welded joint in metals and alloys by measuring the energy dissipation in the weld of the sample by the static hysteresis loop method. **Results and discussion.** It is established that with an increase in the lacks of welding penetration, the energy dissipation increases at the same values of the torque amplitude under static loading conditions. The rigidity of the qualitative welded joints remains constant, and the joints with lacks of welding penetration decrease with increasing torque amplitude. The relationship of strength with stiffness and damping ability obtained by the static hysteresis loop method is preserved for various structural states of the sample material.

For citation: Maytakov A.L., Grachev A.V., Popov A.M., Li S.R., Vetrova N.T., Plotnikov K.B. Study of energy dissipation and rigidity of welded joints obtained by pressure butt welding. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 104–116. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-104-116. (In Russian).

References

1. Leenen R. The modelling and identification of an hysteretic system. The wire-rope as a nonlinear shock vibration isolator. Department of Mechanical Engineering Eindhoven University of Technology. Technische Universiteit Eindhoven, 2012. 45 p.
2. Golovin I.S. Vnutrennee trenie i mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskih materialov [Internal friction and mechanical spectroscopy of metallic materials]. Moscow, MISiS Publ., 2012. 247 p. ISBN 978-5-87623-638-8.
3. Danilin A.N., Shalashilin V.I. A method to identify hysteresis by an example of an antigalloping device. *International Applied Mechanics*, 2010, vol. 46, pp. 588–595. DOI: 10.1007/s10778-010-0345-x.
4. Esteban J., Rogers C.A. Energy dissipation through joints. *Computers & Structures*, 2000, vol. 75 (4), pp. 347–359. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00096-6.

* Corresponding author

Maytakov Anatoly L., Ph.D. (Engineering), Professor
 Kemerovo State University,
 6 Krasnaya st.,
 650000, Kemerovo, Russian Federation
 Tel.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: may585417@mail.ru

5. Rzaev R.A., Dzhalmukhambetov A.U., Smirnov V.V., Atuev Sh.M. Dinamika temperaturnogo polya i otsenka tekhnologicheskikh parametrov pri svarke treniem s peremeshivaniem bimetallicheskikh plastin [The temperature field dynamics and estimation of technological parameters at welding by friction with hashing of bimetallic plates]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 1 (2), pp. 274–278.

6. Zhang Z., Liu M., Su Z., Xiao Y. Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, pp. 156–170. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.07.001.

7. Kolubaev E.A. Osobennosti formirovaniya struktury svarnogo soedineniya, poluchennogo svarkoi treniem s peremeshivaniem [Features of the formation of the structure of a welded joint obtained by friction stir welding]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, pp. 887–894.

8. Statsenko V.N., Negoda E.N., Sukhorada A.E. Issledovanie teplovlozheniya i temperaturnykh polei pri svarke treniem s peremeshivaniem [An investigation of heat input and temperature fields in friction stir welding]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*, 2017, no. 3 (32), pp. 150–155. DOI: 10.5281/zenodo.897023.

9. Nikulina A.A. *Struktura i svoystva raznorodnykh soedinenii, poluchennykh metodami svarki i naplavyki uglevodistykh i legirovannykh stalei*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Structure and properties of dissimilar joints obtained by welding and surfacing of carbon and alloy steels. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2020. 37 p.

10. Levihina A.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Monitoring obrazovaniya nesploshnostei metodom akusticheskoi emissii v protsesse svarki treniem s peremeshivaniem [Defect formation monitoring using acoustic emission method during friction stir]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya of Altai State University*, 2017, no. 4 (96), pp. 39–44. DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-06.

11. Okolovich G.A. *Metallovedenie instrumental'nogo proizvodstva* [Metal science of tool production], Barnaul, AltSTU Publ., 2020. 242 p. ISBN 978-5-7568-1326-5.

12. Krivonos E.V., Chernykh I.K., Matuzko E.N., Vasiliev E.V. Analiz defektov, vznikayushchikh pri svarke treniem s peremeshivaniem [Analysis of defects caused by friction welding with stirs]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 2 (152), pp. 24–27. (In Russian).

13. Chernykh I.K., Vasil'ev E.V., Chekalin I.L., Krivonos E.V., Makashin D.S. Poluchenie svarnogo soedineniya plastin iz titanovykh splavov metodom svarki treniem s peremeshivaniem [Welded joint of titanium plates manufacturing by friction stir welding]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 198–207. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-198-207.

14. Chekalin I.L., Chernykh I.K., Krivonos E.V., Vasiliev E.V. Sposoby povysheniya kachestva shvov, poluchennykh pri pomoshchi svarki treniem s peremeshivaniem [Methods of upgrading the quality of friction stir welds]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 5 (155), pp. 43–46. (In Russian).

15. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding. *Wear*, 2010, vol. 268, no. 1–2, pp. 59–66. DOI: 10.1016/j.wear.2009.06.027.

16. Wolf A., Lafarge R., Brosius A. A non-destructive testing method for joints by the measurement of the energy dissipation. *Production Engineering: Research and Development*, 2019, vol. 13, pp. 99–106. DOI: 10.1007/s11740-018-0860-x.

17. Kul'kov V.G., Syshchikov A.A. Vnutrennee trenie na granitsakh zeren, sodержashchikh protyazhennye pory [Internal friction at grain boundaries elongated pores]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 3, pp. 23–25. DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47267.17580. (In Russian).

18. Kuritsyn D.I. *Svarka treniem peremeshivaniem: issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov protsessa na kachestvo soedinenii, razrabotka sredstv osnashcheniya* [Friction stir welding: Study of the influence of technological factors of the process on the quality of joints, development of equipment]. Saarbrücken, Deutschland, LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 162 p. ISBN 978-3-659-39314-3.

19. Ogawa Y., Horita T., Iwatani N., Kadoi K., Shiozawa D., Sakagami T. Evaluation of fatigue strength based on dissipated energy for laser welds. *Engineering Proceedings*, 2021, vol. 8, pp. 6–12. DOI: 10.3390/engproc2021008006.

20. Zhao Z., Chen Q., Zhang R., Pan C., Jiang Y. Energy dissipation mechanism of inerter systems. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 184, p. 105845. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105845.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний волокнутого полимерного композита на основе обработанных волокон муньи

Савендра Сингх^{а, *}, Четан Хирвани^б

Национальный технологический институт Патны, Патна, Бихар, 800005, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-5151-0284>,  savendrasingh123@gmail.com, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-4291-4575>,  hirwani.ck22@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678

История статьи:

Поступила: 24 мая 2023
Рецензирование: 06 июня 2023
Принята к печати: 13 июня 2023
Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Мунья (*Saccharum munja*)
Компрессионная формовочная машина
Частота свободных колебаний
Демпфирование
Испытание на растяжение
Дисперсионный анализ (ANOVA)

Благодарности

Авторы очень благодарны руководству Инженерного колледжа Райкия (Азамгарх) за предоставленную лабораторию для проведения исследовательской работы.

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время исследователи, будучи обеспокоенными состоянием окружающей среды, изучают новые слоистые материалы, которые бы могли удовлетворить потребности общества, и способы их получения из возобновляемых и биоразлагаемых ресурсов. Натуральные волокна различного происхождения рассматриваются с целью замены синтетических. **Цель работы.** В настоящем исследовании обработанные волокна муньи (*Saccharum munja*) в виде частиц (PC), коротких и случайных (SRC) и однонаправленных (UDC) волокон предложены в качестве армирующего компонента композиционного материала с матрицей из смолы AW106 и отвердителя HV953. В работе проведена оценка механических свойств волокон муньи. Частота свободных колебаний с соответствующими коэффициентами затухания, до шестого порядка включительно, измерена для анализа возможности применения композитного материала. **Методы исследования.** Для изготовления слоистых композиционных материалов использована компрессионная формовочная машина. Предварительной поверхностной обработкой с волокон удалили пыль, лигнин и гемицеллюлозу, что обеспечило получение наиболее подходящих значений свободных колебаний и механических свойств. **Результаты и обсуждение.** Испытания на растяжение и изгиб показывают самое высокое значение прочности 170 МПа и 143 МПа в случае UDC-композита, а самое низкое – в случае PC-композита. Добавление волокон муньи в эпоксидную матрицу улучшает адгезию. Композит PC показывает лучшее значение затухания, чем композит SRC и UDC. Наивысшие значения частоты свободных колебаний 43, 233, 298, 849, 918 и 1440 Гц характерны для UDC-композита независимо от всех режимов. Результаты анализа свободных колебаний показывают, что волокнутовый композит на основе волокон муньи может быть использован в качестве конструкционного материала. Дисперсионный анализ (ANOVA) показывает, что экспериментальные результаты, полученные в ходе испытаний на растяжение и изгиб, значительны.

Для цитирования: Сингх С.П., Хирвани Ч.К. Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний волокнутого полимерного композита на основе обработанных волокон муньи // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 117–125. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-117-125.

Введение

В последние годы натуральное волокно стало конкурентоспособным альтернативным материалом. Натуральные волокна являются полезными материалами и могут заменить синтетические волокна [1]. Недавние исследования показывают, что натуральные волокна могут заменить стекловолокно [2]. В связи с усиливаю-

щимся энергетическим кризисом и повышением экологической сознательности большое внимание уделяется натуральным волокнам и различным композитам на их основе [3]. Извлечение волокон травы муньи (*Saccharum munja*) и их использование в композиционных материалах описано в работе [4]. Было проведено много исследований полимерных композиционных материалов на основе натуральных волокон из-за их хороших механических свойств. В последние 20 лет наблюдается большой интерес к использованию целлюлозных и лигноцеллюлозных сельскохозяйственных продуктов в композиционных

*Адрес для переписки

Сингх Савендра Пратап,
Национальный технологический институт Патны,
Патна, Бихар, 800005, Индия
Тел.: +91-9455446960, e-mail: savendrasingh123@gmail.com

материалах, особенно с целью армирования матрицы [5].

В отличие от синтетических волокон, таких как кевлар, нейлон, полиэстр, искусственный шелк, стекло и углерод, натуральные волокна имеют много преимуществ. Химический состав и клеточная структура натуральных волокон достаточно сложны [6]. Помимо преимуществ использования экологически чистых материалов существуют и определенные трудности, такие как относительно плохое межфазное сцепление «матрица – волокно» при армировании и повышенное влагопоглощение. Потенциальными сырьевыми материалами для использования в промышленности, включая электротехническую, автомобильную, упаковочную и бытовую, являются сизаль, абака, ананас, агава и банановое волокно [7]. Полимерные композиты на основе синтетических волокон обладают превосходными механическими свойствами и легкой конструкцией [8]. Распределение волокон и механические свойства композиционных материалов были в некоторой мере улучшены за счет обработки волокон глиной с неорганической добавкой, хотя, вероятно, в этой области необходима дополнительная минеральная присадка [9]. В последнее время автомобильная промышленность заинтересовалась композиционными материалами на основе натуральных волокон по ряду причин, включая повышение эффективности использования топлива транспортных средств и возросшее беспокойство общественности по поводу постоянства экологической целостности и запаса ресурсов [10].

Добавление рисовых отрубей в полилактидную матрицу (PLA) улучшает механические свойства и частоты свободных колебаний PLA-композита из рисовых отрубей, который можно использовать для 3D-печати [11]. Добавление коротких альфа-волокон в эпоксидную смолу делает композит более деформируемым и гибким за счет более низких значений жесткости и высокой пластичности [12]. На основании результатов анализа свободных колебаний композита из бамбукового волокна его рекомендуют применять в транспортной и строительной промышленности [13]. Поверхностная обработка натурального волокна улучшает его механические свойства и показатели свободных колебаний [14–17]. Значения частоты свободных колебаний

гибкого волокнистого композита зависят от направления и толщины волокна [18]. На частоту свободных колебаний композиционного волокна на основе волокна алоэ вера влияет последовательность укладки волокон, толщина композита и конечные условия [19]. Частота свободных колебаний композитной балки возрастает с увеличением толщины композита независимо от граничных условий. Это также усиливает затухание колебаний композитного материала [20, 21].

Из вышеприведенной литературы можно сделать вывод, что исследователями был выполнен наибольший объем работ по изучению механических свойств композиционных материалов из натуральных волокон, однако работам, связанным с характеристиками свободных колебаний, уделялось меньше внимания. В настоящей статье механические свойства полимерного композиционного материала на основе волокна муньи были исследованы вместе с его характеристиками свободных колебаний. Собственная частота с соответствующими коэффициентами затухания до шестого порядка включительно была получена на экспериментальной установке. Дисперсионный анализ (ANOVA) был выполнен для проверки уровня значимости испытаний на растяжение и изгиб.

Материалы и методы исследования

Обработанные волокна муньи (*Saccharum munja*) в виде частиц (PC), коротких и случайных (SRC) и однонаправленных (UDC) волокон рассмотрены в качестве армирующего компонента композиционного материала, в то время как смола AW106 и соответствующее количество отвердителя HV953, поставляемые предприятиями Prakash (Азамгарх, Уттар-Прадеш, Индия), использовались в качестве матричного материала. Волокна муньи были извлечены из сухого растения, полученного недалеко от берега реки Гагара (Гонда, Уттар-Прадеш, Индия). Волокна муньи промывали одномолярным раствором NaOH в течение 30 минут, после чего снова промывали в дистиллированной воде в течение 1 часа для удаления следов NaOH. Далее промытые волокна сушили в горячей ткани при температуре 120 °C в течение 30 минут. Затем их снова промывали в дистиллированной воде и дополнительно сушили в горячей ткани для уда-

ления любых оставшихся частей NaOH и воды с поверхности волокна. Композиции с различными объемными соотношениями, используемые в настоящем исследовании, представлены в

табл. 1. Для изготовления слоистых композиционных материалов (КМ) размером 30×30×3 см использовалась машина для компрессионного формования, представленная на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Состав композиционного материала (по объему)
Composite composition (by Volume)

№	Использованный материал	Условное обозначение	Марка	Объем, доля
1	Чистая смола, дм ³	NR	ARALDITE AW106	1
2	Отвердитель, дм ³		Hardener HV 953 IN	1
3	Частицы волокон муньи, %	PC	—	20
4	Однонаправленные волокна муньи, %	UDC	—	20
5	Короткие и случайные волокна муньи, %	SRC	—	20



Рис. 1. Компрессионная формовочная машина

Fig. 1. Compression moulding machine

Сначала в полость формы заливали известную массу смолы и отвердителя и ждали 90 минут для начала затвердевания. Затем заливали смесь волокна и смолы и снова ждали 90 минут. Смесь прессовали при давлении 120 бар и выдерживали при 800 °С в течение 48 часов. Процесс изготовления слоистых КМ из волокна муньи представлен на рис. 2. Изготовленные слоистые КМ были разрезаны на образцы разной формы и размера в соответствии со стандартами ASTM для дальнейшего анализа.

Для испытания на растяжение образцов волокнисто-полимерного композита прямоугольной формы с расчетной длиной 57 мм использовали стандарт ASTM D638. Испытание проводили на цифровой универсальной испытательной машине (UTM) производства компании Aimil private limited, (Бангалор, Индия) с точностью позицио-

нирования 0,001 мм и скоростной погрешностью 0,005 %. Испытуемый образец сначала закрепляли между зажимами UTM, а затем подвергали возрастающей нагрузке со скоростью растяжения 3 мм в минуту до тех пор, пока образец не ломался. Пять различных образцов были вырезаны из пяти различных слоистых КМ и использованы для испытаний на растяжение, чтобы гарантировать воспроизводимость испытаний и учитывать средние значения.



Рис. 2. Процесс изготовления слоистых КМ

Fig. 2. Fabrication process

Испытание на изгиб было выполнено на той же цифровой универсальной испытательной машине (UTM) для образцов с пучковым распределением волокон муньи в соответствии со спецификациями ASTM D790. Для каждой комбинации рассматривались пять образцов размером $1560 \times 15 \times 3,5$ мм, и были приняты средние результаты для обеспечения воспроизводимости испытаний, при этом скорость испытания на изгиб соответствовала скорости испытания на растяжение.

Характеристики свободных колебаний проанализированы с использованием экспериментальной установки, показанной на рис. 3, а и б соответственно, для оценки начальных шести собственных частот и соответствующего коэффициента затухания с помощью частотной характеристики и с использованием метода аппроксимирующих окружностей соответственно. В этом исследовании на основании резонансных характеристик матриц жесткости и массы рассмотрен пик с шестью видимыми резонансами. Основная цель проведения испытаний для определения свободных колебаний – выяснить возможность применения рассматриваемого композита в качестве конструкционного или демпфирующего материала. Образец для испытания имел форму консольной балки с размерами $160 \times 10 \times 3,5$ мм. Соответствующие коэффициенты затухания были рассчитаны с помощью метода фиксированной окружности. Для расчета коэффициентов затухания использовалось уравнение

$$\zeta = \frac{\omega_2^2 \omega_1^2}{2\omega_0 \left[\omega_2 \tan \frac{\alpha_2}{2} + \omega_1 \tan \frac{\alpha_1}{2} \right]}.$$

Результаты и их обсуждение

Испытание на растяжение

Результаты испытания на растяжение образцов в форме гантели (рис. 4) свидетельствуют о том, что механические свойства слоистого КМ увеличиваются при добавлении волокон в матрицу. Временное сопротивление разрушению NR составляет 62 МПа, а при добавлении в смолу 20 % PC-волокон муньи временное сопротивление разрушению возрастает до 85 МПа. Добавление 20 % SRC-волокна в эпоксидную смолу повышает временное сопротивление раз-

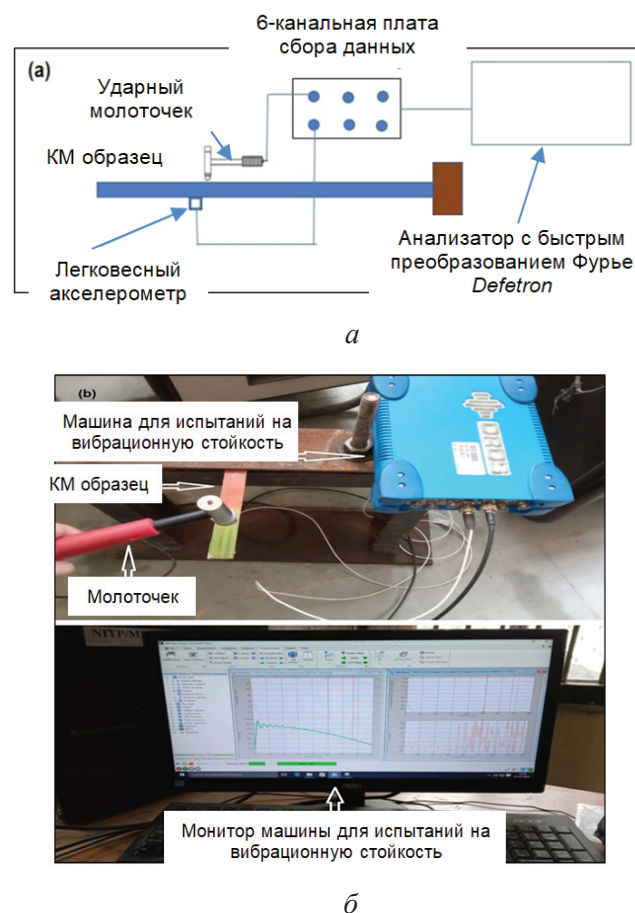


Рис. 3. Определение характеристик свободных колебаний волокнистого полимерного композита на основе обработанной муньи:

а – схема; б – процедура

Fig. 3. Vibration testing:

а – block diagram of free vibration; б – free vibration testing

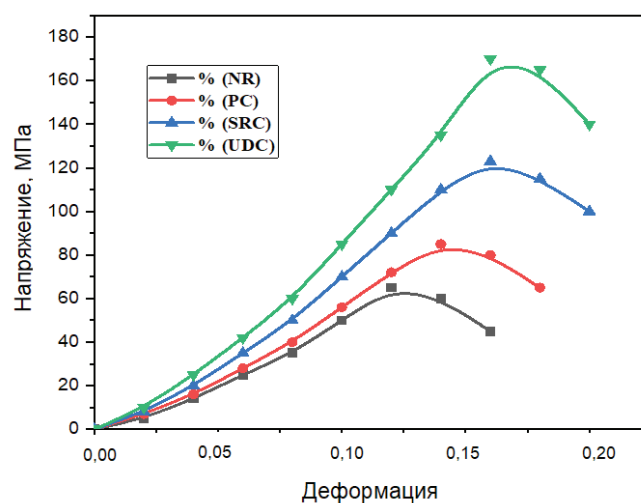


Рис. 4. Поведение при растяжении полимерного композита из волокна муньи

Fig. 4. Tensile behavior of *Saccharum munja* fiber polymer composite

рушению до 123 МПа. Добавление 20 % UDC-волокон в эпоксидную смолу также повышает временное сопротивление разрушению до 170 МПа. Наибольшее временное сопротивление разрушению UDC-композитов составляет 170 МПа, что на 28 % больше, чем предел прочности SRC-композитов, на 50 % больше, чем прочность PC-композитов, и на 63 % больше, чем прочность NR. Добавление волокон муньи в полимерную матрицу увеличивает остаточную деформацию композитного полимера на основе волокна муньи. Временное сопротивление разрушению, равное 85 МПа, было в случае PC, что на 28 % больше, чем предел прочности при растяжении NR.

Испытание на изгиб

Образец полимерного композита из волокна муньи был подвергнут испытанию на изгиб при помощи цифровой универсальной испытательной машины (UTM). Результаты испытаний представлены на рис. 5. Обнаружено, что самая высокая прочность на изгиб характерна для UDC-композита и составила 143 МПа, когда в эпоксидную смолу добавили 20 % UDC-волокон. Самая низкая прочность на изгиб зафиксирована для NR и составила 65 МПа, а прочность на изгиб двух образцов SRC-композита и PC-композита при повторной разработке составляла 113 и 102 МПа при использовании 20 % SRC- и PC-волокон соответственно. Прочность на изгиб UDC-композита на 21 % больше, чем прочность

на изгиб SRC-композита, и на 28 % больше, чем прочность на изгиб PC-композита, и составляет приблизительно 54 % прочности на изгиб NR.

Определение собственных колебаний

Результаты испытаний на свободные колебания, проведенных на экспериментальной установке, представлены в табл. 2. В этом эксперименте было получено шесть собственных частот и коэффициентов затухания, вычисленных в результате обработки методом огибающих. Основная частота из шести частот для NR, PC, SRC и UDC имеет значения 19, 32, 39 и 43 Гц, коэффициенты затухания составляют 0,160, 0,072, 0,065 и 0,051 соответственно, а последняя частота (с коэффициентами затухания) равна 506 Гц (0,022), 1052 Гц (0,017), 1124 Гц (0,015) и 1440 Гц (0,012). Полученное значение коэффициента затухания указывает на практическое использование полимерного композита из волокна муньи в различных сферах, таких как автомобили, продукты безопасности, в производственных фирмах и др.

Дисперсионный анализ (ANOVA)

Чтобы проверить уровень значимости полученных результатов при испытаниях на растяжение и изгиб с уровнем альфа 5 %, был проведен дисперсионный анализ (ANOVA) композита на основе волокна муньи. Значение вероятности в обоих случаях составило менее 0,05, что подтверждает значимость полученных экспериментальных результатов при испытаниях на растяжение и изгиб (табл. 3).

Закключение

Из приведенного выше исследования становится очевидно, что добавление волокон муньи в эпоксидную матрицу улучшает механические свойства, а также характеристики свободной вибрации. Самое высокое значение прочности на растяжение и изгиб наблюдается в случае UDC-композита, за которым следует SRC-композит, а самое низкое значение получено в случае PC-композита. Сохранение натурального волокна в сердцевине ком-

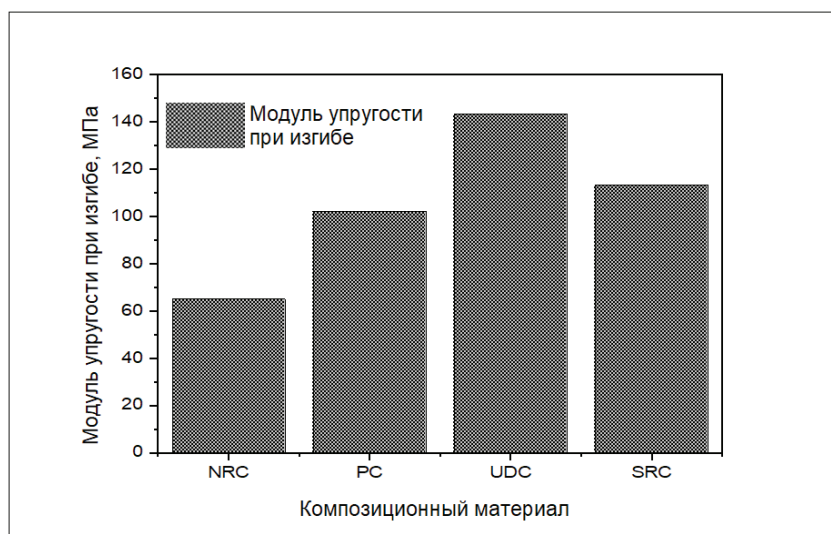


Рис. 5. Поведение полимерного композита из волокна муньи

Fig. 5. Flexural behavior of *Saccharum munja* fiber polymer composite

Таблица 2

Table 2

Характер свободных колебаний, известный также как анализ динамического поведения, полимерного композита на основе волокна муньи

Free vibration behavior (also known as Dynamic Behavior Analysis) of *Saccharum munja* fiber polymer composite

Композиционный материал	Собственная частота и коэффициент затухания колебаний волокна муньи					
	Мод 1	Мод 2	Мод 3	Мод 4	Мод 5	Мод 6
NR	19 0,160	95 0,074	125 0,059	353 0,033	380 0,029	506 0,022
PC	32 0,072	172 0,045	213 0,050	611 0,021	677 0,023	1052 0,017
SRC	39 0,065	187 0,039	233 0,030	689 0,020	741 0,018	1124 0,015
UDC	43 0,051	233 0,031	298 0,021	849 0,016	918 0,015	1440 0,012

Таблица 3

Table 3

Дисперсионный анализ (ANOVA) полимерного композита из волокна муньи

ANONA analysis of Saccharum munja fiber polymer composite

Испытание	Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F-критерий
Испытание на растяжение	Меж-групповой	15 610,95	4	5203,65	2973,514	0,0000	3,238872
	Внутри-групповой	28	16	1,75			
Испытание на изгиб	Меж-групповой	15 610,95	4	5203,65	2973,514	0,0000	3,238872
	Внутри-групповой	28	16	1,75			

композита способствует лучшей передаче нагрузки, что приводит к более высоким свойствам. Благодаря наибольшей адгезии волокна к матрице в случае UDC-композита обеспечивается лучшее механическое поведение и поведение при свободных вибрациях. Собственные частоты, соответствующие всем формам колебаний, лучше обнаруживаются в случае UDC-композита. PC-композит показывает лучшие значения коэффициента затухания. Значения коэффициентов затухания указывают на возможность применения композиционного материала на основе волокна муньи в качестве конструкционного материала. Дисперсионный анализ (ANOVA) показывает, что все результаты на растяжение и изгиб значимы.

Список литературы

1. Rajesh M., Singh S.P., Pitchaimani J. Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics // Journal of Industrial Textiles. – 2018. – Vol. 47 (5). – P. 938–959. – DOI: 10.1177/1528083716679157.
2. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites / M. Idicula, A. Boudenne, L. Umadevi, L. Ibos, Y. Candau, S. Thomas // Composites Science and Technology. – 2006. – Vol. 66 (15). – P. 2719–2725. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.03.007.
3. Characterization of the mechanical and morphological properties of cow dung fiber-reinforced polymer composites: a comparative study with corn stalk fiber composites and sisal fiber composites / S. Wu, M. Guo, J. Zhao, Q. Wu, J. Zhuang, X. Jiang // Polymers



(Basel). – 2022. – Vol. 14 (22). – P. 5041. – DOI: 10.3390/polym14225041.

4. Extraction and characterization of Munja fibers and its potential in the biocomposites / M.K. Lila, U.K. Komal, Y. Singh, I. Singh // *Journal of Natural Fibers*. – 2022. – Vol. 19 (7). – P. 2675–2693. – DOI: 10.1080/15440478.2020.1821287.

5. *Evon P.* Special Issue “Natural Fiber Based Composites” // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11 (9). – P. 1031. – DOI: 10.3390/coatings11091031.

6. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites / M.Z. Rong, M.Q. Zhang, Y. Liu, G.C. Yang, H.M. Zeng // *Composites Science and Technology*. – 2001. – Vol. 61 (10). – P. 1437–1447. – DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00046-X.

7. *Li Y., Mai Y.-W., Ye L.* Sisal fibre and its composites: a review of recent developments // *Composites Science and Technology*. – 2000. – Vol. 60 (11). – P. 2037–2055. – DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00101-9.

8. Synthesis and characterization of corn starch based green composites reinforced with Saccharum spontaneum L graft copolymers prepared under microwave and their effect on thermal, physio-chemical and mechanical properties / M. Maiti, B.S. Kaith, R. Jindal, A.K. Jana // *Polymer Degradation and Stability*. – 2010. – Vol. 95 (9). – P. 1694–1703. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.05.024.

9. Effect of extruder elements on fiber dimensions and mechanical properties of bast natural fiber polypropylene composites / A.M.M. El-Sabbagh, L. Steuernagel, D. Meiners, G. Ziegmann // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2014. – Vol. 131. – P. 40465. – DOI: 10.1002/app.40435.

10. *Naik V., Kumar M., Kaup V.* A review on natural fiber composite material in automotive applications // *Engineered Science*. – 2022. – Vol. 18. – P. 1–10. – DOI: 10.30919/es8d589.

11. *Singh S.P., Hirwani C.K.* Mechanical, free vibration and modal damping behaviour of treated rice bran green composite for 3D printing application using RSM and design of experiment method // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2022. – DOI: 10.1007/s42417-022-00818-z.

12. Effect of fiber content and curvature on probabilistic free vibration analysis of cylindrical shallow shells reinforced by short natural fibers / Z. Guezzen, L. Errouane, Z. Hammou, A. Boussoufi, Z. Sereir // *Industrial Crops and Products*. –

2023. – Vol. 197. – P. 116480. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116480.

13. The effect of constituent units on the vibration reduction of bamboo engineering materials: The synergistic vibration reduction mechanism of bamboo stiffness and wood damping / L. Chen, S. Han, D. Li, F. Chen, G. Wang // *Industrial Crops and Products*. – 2022. – Vol. 189. – P. 115785. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115785.

14. *Dalai T., Biswal M.* Experimental and numerical studies on free vibration of natural fiber laminated composite plates // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 221. – P. 453–461. – DOI: 10.1007/978-981-16-8433-3_39.

15. *Fahim S., Elhaggar S.M., Elayat H.* Experimental investigation of natural fiber reinforced polymers // *Materials Sciences and Applications*. – 2012. – Vol. 3 (2). – P. 59–66. – DOI: 10.4236/msa.2012.32009.

16. Analytical and numerical investigation of free vibration for stepped beam with different materials / S.N. Ghani, R.A. Neamah, A.T. Abdalzahra, L.S. Al-Ansari, H.J. Abdulsamad // *Open Engineering*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 184–196. – DOI: 10.1515/eng-2022-0031.

17. Effect of natural fiber reinforced polypropylene composite using resin impregnation / G. Nam, N. Wu, K. Okubo, T. Fujii // *Agricultural Sciences*. – 2014. – Vol. 5 (13). – P. 1338–1343. – DOI: 10.4236/as.2014.513143.

18. Characterization of the vibrational behaviour of flax fibre reinforced composites with an interleaved natural viscoelastic layer / H. Daoud, A. El Mahi, J.-L. Rebière, M. Taktak, M. Haddar // *Applied Acoustics*. – 2017. – Vol. 128. – P. 23–31. – DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.12.005.

19. *Thomas P., Jenarathanan M.P., Sreehari V.M.* Free vibration analysis of a composite reinforced with natural fibers employing finite element and experimental techniques // *Journal of Natural Fibers*. – 2020. – Vol. 17 (5). – P. 688–699. – DOI: 10.1080/15440478.2018.1525466.

20. *Singh S.P., Dutt A., Hirwani C.K.* Experimental and numerical analysis of different natural fiber polymer composite // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 38, iss. 3. – P. 322–332. – DOI: 10.1080/10426914.2022.2136379.

21. *Kuppuraj A., Angamuthu M.* Investigation of mechanical properties and free vibration behavior of graphene/basalt nano filler banana/sisal hybrid composite // *Polymers and Polymer Composites*. – 2022. – Vol. 30. – DOI: 10.1177/09673911211066719.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Analysis of mechanical behavior and free vibration characteristics of treated Saccharum munja fiber polymer composite

Savendra Singh ^{a, *}, Chetan Hirwani ^b

Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Patna, Patna, Bihar, 800005, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-5151-0284>, savendrasingh123@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4291-4575>, hirwani.ck22@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 May 2023
 Revised: 06 June 2023
 Accepted: 13 June 2023
 Available online: 15 September 2023

Keywords:

Saccharum munja
 Compression moulding machine
 Natural frequency
 Damping
 Tensile test
 ANOVA

Acknowledgements

Authors are very thankful to Rajkiya Engineering College, Azamgarh for providing laboratory for research work.

ABSTRACT

Introduction. With increasing environmental concern nowadays, researchers are studying new alternating materials that can meet the society needs and are extracted from renewable and biodegradable resources. The various natural fibers have been investigated by researchers to replace synthetic ones. **The purpose of the work.** In present study, treated saccharum munja fibers considered as reinforcement material in Particulate (PC), Short and Random (SRC) and in Unidirectional (UDC) form along with AW106 Resin and HV953. The paper assesses the mechanical properties of Munja fibers (*Saccharum munja*). Initial six natural frequencies along with corresponding damping factors are measured to analyze the possibility of using a composite material. **Research methods.** A compression molding machine was used to form laminated composite materials. Surface treatment of fibers removes the dust, lignin and hemicellulose, which improves mechanical and free vibration properties. **Results and Discussion.** Tensile and flexural test shows the highest value of strength 170 MPa and 143 MPa in case of UDC composite, and the lowest in the case of PC. Addition of munja fiber to epoxy matrix enhances the fiber matrix adhesion bonding. The PC composite shows better value of damping than SRC and UDC composite. The highest natural frequency 43, 233, 298, 849, 918 and 1,440 Hz obtained in case of UDC irrespective of all modes. The results of the free vibration analysis show that *Saccharum Munja* fiber composite may be used as structural material. Analysis of variance (ANOVA) shows that the experimental results output in case of tensile and flexural tests are significant.

For citation: Singh S.P., Hirwani C.K. Analysis of mechanical behavior and free vibration characteristics of treated Saccharum munja fiber polymer composite. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 117–125. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-117-125. (In Russian).

References

1. Rajesh M., Singh S.P., Pitchaimani J. Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, vol. 47 (5), pp. 938–959. DOI: 10.1177/1528083716679157.
2. Idicula M., Boudenne A., Umadevi L., Ibos L., Candau Y., Thomas S. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 2006, vol. 66 (15), pp. 2719–2725. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.03.007.
3. Wu S., Guo M., Zhao J., Wu Q., Zhuang J., Jiang X. Characterization of the mechanical and morphological properties of cow dung fiber-reinforced polymer composites: a comparative study with corn stalk fiber composites and sisal fiber composites. *Polymers (Basel)*, 2022, vol. 14 (22), p. 5041. DOI: 10.3390/polym14225041.

* Corresponding author

Singh Savendra Pratap, Assistant professor
 Department of Mechanical Engineering
 National Institute of Technology Patna,
 800005, Patna, Bihar, India
 Tel.: +91-9455446960, e-mail: savendrasingh123@gmail.com



4. Lila M.K., Komal U.K., Singh Y., Singh I. Extraction and characterization of Munja fibers and its potential in the biocomposites. *Journal of Natural Fibers*, 2022, vol. 19 (7), pp. 2675–2693. DOI: 10.1080/15440478.2020.1821287.
5. Evon P. Special Issue “Natural Fiber Based Composites”. *Coatings*, 2021, vol. 11 (9), p. 1031. DOI: 10.3390/coatings11091031.
6. Rong M.Z., Zhang M.Q., Liu Y., Yang G.C., Zeng H.M. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 2001, vol. 61 (10), pp. 1437–1447. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00046-X.
7. Li Y., Mai Y.-W., Ye L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology*, 2000, vol. 60 (11), pp. 2037–2055. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00101-9.
8. Maiti M., Kaith B.S., Jindal R., Jana A.K. Synthesis and characterization of corn starch based green composites reinforced with Saccharum spontaneum L graft copolymers prepared under micro-wave and their effect on thermal, physio-chemical and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, vol. 95 (9), pp. 1694–1703. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.05.024.
9. El-Sabbagh A.M.M., Steuernagel L., Meiners D., Ziegmann G. Effect of extruder elements on fiber dimensions and mechanical properties of bast natural fiber polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, vol. 131, p. 40465. DOI: 10.1002/app.40435.
10. Naik V., Kumar M., Kaup V. A review on natural fiber composite material in automotive applications. *Engineered Science*, 2022, vol. 18, pp. 1–10. DOI: 10.30919/es8d589.
11. Singh S.P., Hirwani C.K. Mechanical, free vibration and modal damping behaviour of treated rice bran green composite for 3D printing application using rsm and design of experiment method. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022. DOI: 10.1007/s42417-022-00818-z.
12. Guezzen Z., Errouane L., Hammou Z., Boussoufi A., Sereir Z. Effect of fiber content and curvature on probabilistic free vibration analysis of cylindrical shallow shells reinforced by short natural fibers. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 197, p. 116480. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116480.
13. Chen L., Han S., Li D., Chen F., Wang G. The effect of constituent units on the vibration reduction of bamboo engineering materials: The synergistic vibration reduction mechanism of bamboo stiffness and wood damping. *Industrial Crops and Products*, 2022, vol. 189, p. 115785. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115785.
14. Dalai T., Biswal M. Experimental and numerical studies on free vibration of natural fiber laminated composite plates. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 221, pp. 453–461. DOI: 10.1007/978-981-16-8433-3_39.
15. Fahim S., Elhaggag S.M., Elayat H. Experimental investigation of natural fiber reinforced polymers. *Materials Sciences and Applications*, 2012, vol. 3 (2), pp. 59–66. DOI: 10.4236/msa.2012.32009.
16. Ghani S.N., Neamah R.A., Abdalazhara A.T., Al-Ansari L.S., Abdulsamad H.J. Analytical and numerical investigation of free vibration for stepped beam with different materials. *Open Engineering*, 2022, vol. 12 (1), pp. 184–196. DOI: 10.1515/eng-2022-0031.
17. Nam G., Wu N., Okubo K., Fujii T. Effect of natural fiber reinforced polypropylene composite using resin impregnation. *Agricultural Sciences*, 2014, vol. 5 (13), pp. 1338–1343. DOI: 10.4236/as.2014.513143.
18. Daoud H., El Mahi A., Rebière J.-L., Taktak M., Haddar M. Characterization of the vibrational behaviour of flax fibre reinforced composites with an interleaved natural viscoelastic layer. *Applied Acoustics*, 2017, vol. 128, pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.12.005.
19. Thomas P., Jenarathanan M.P., Sreehari V.M. Free vibration analysis of a composite reinforced with natural fibers employing finite element and experimental techniques. *Journal of Natural Fibers*, 2020, vol. 17 (5), pp. 688–699. DOI: 10.1080/15440478.2018.1525466.
20. Singh S.P., Dutt A., Hirwani C.K. Experimental and numerical analysis of different natural fiber polymer composite. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, vol. 38, iss. 3, pp. 322–332. DOI: 10.1080/10426914.2022.2136379.
21. Kuppuraj A., Angamuthu M. Investigation of mechanical properties and free vibration behavior of graphene/basalt nano filler banana/sisal hybrid composite. *Polymers and Polymer Composites*, 2022, vol. 30. DOI: 10.1177/09673911211066719.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Синтез интерметаллидов системы Ti–Fe из смесей элементарных порошков

Геннадий Прибытков^{a, *}, Антон Барановский^b, Виктория Коржова^c,
Ирина Фирсина^d, Владимир Кривопапов^e

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-8267-971X>, gapribyt@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8800-4716>, nigalisha@gmail.com,
^c <https://orcid.org/0000-0003-0835-9264>, vicvic5@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2253-0582>, iris1983@yandex.ru,
^e <https://orcid.org/0009-0003-3224-1749>, krivopalov@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК554.332-971.2+661.88

История статьи:

Поступила: 10 мая 2023
Рецензирование: 23 мая 2023
Принята к печати: 21 июня 2023
Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Порошковые смеси
Механоактивация синтеза
Тепловой взрыв
Интерметаллиды железо – титан
Фазовый состав
Энтальпия образования соединений

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00106): «In situ синтез металлома-тричных композитов с субмикрон-ной карбидной упрочняющей фазой».

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Интерметаллические соединения Fe₂Ti и FeTi находят практическое применение в качестве аккумуляторов водорода (FeTi) или в качестве магнитных материалов (Fe₂Ti). Из-за особенностей двойной равновесной диаграммы получение этих интерметаллидов литьем затруднено, поэтому широко используются методы порошковой металлургии в сочетании с предварительной механоактивацией порошковых смесей. **Цель работы:** исследовать возможность получения однофазных соединений из порошковых смесей титана и железа целевых составов. **Методы исследования.** Механоактивированные порошковые смеси, продукты горения и последующего отжига исследовали методами рентгенофазового анализа, оптической металлографии и растровой электронной микроскопии с определением элементного состава методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. **Методика исследования.** Порошковые смеси в течение 20 минут подвергали механоактивации в планетарной мельнице Activator 2S при интенсивности 40g и соотношении шары/смесь, равном 20. Механоактивированные смеси нагревали в герметичном реакторе в среде аргона со средней скоростью 85 град/мин. **Результаты и обсуждение.** При температуре около 500 °C на термограммах с термопар, помещенных в механоактивированную смесь, появлялся резкий подъем (тепловой взрыв), свидетельствующий об экзотермической реакции в смеси. Величина подъема для состава 2Fe+Ti оказалась значительно больше, чем для состава Fe+Ti. Рентгеноструктурный анализ показал, что основным продуктом реакции для обеих смесей является соединение Fe₂Ti. Преимущественное образование Fe₂Ti, так же как больший тепловой эффект в смеси состава 2Fe+Ti, объясняется большей отрицательной энтальпией образования Fe₂Ti по сравнению с FeTi (–87,45 и –40,58 ккал/моль соответственно). **Выводы.** Высокотемпературные гомогенизирующие отжиги продуктов теплового взрыва с целью получения однофазных целевых продуктов не дали положительного результата. Содержание побочных фаз и непрореагировавших реагентов мало изменилось после отжигов. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что термодинамический фактор (энтальпия образования интерметаллида) является основным фактором, определяющим фазовый состав продуктов синтеза в порошковых смесях титана и железа.

Для цитирования: Синтез интерметаллидов системы Ti–Fe из смесей элементарных порошков / Г.А. Прибытков, А.В. Барановский, В.В. Коржова, И.А. Фирсина, В.П. Кривопапов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 126–136. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-126-136.

Введение

На равновесной диаграмме железо – титан имеются два интерметаллических соединения: Fe₂Ti и FeTi (рис. 1). Из интерметаллидов системы железо – титан наиболее подробно исследован монотитанид железа FeTi. Это соединение

*Адрес для переписки

Прибытков Геннадий Андреевич, д.т.н.,
главный научный сотрудник, доцент
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4,
634055, Томск, Россия
Тел.: +7 (913) 860-04-49, e-mail: gapribyt@mail.ru

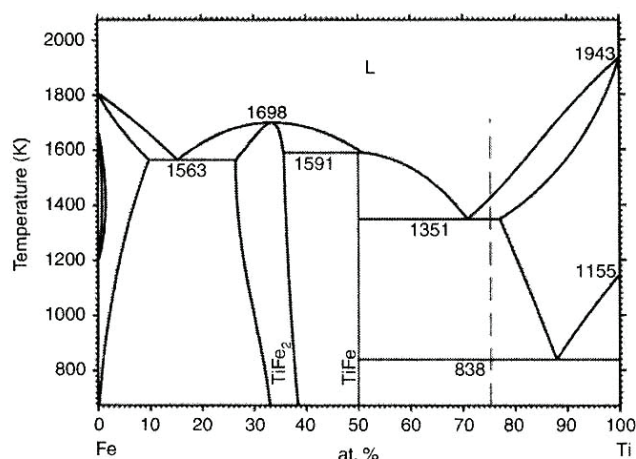


Рис. 1. Равновесная диаграмма железо – титан

Fig. 1. Phase diagram of the Fe-Ti system

известно как перспективный материал – аккумулятор водорода. По водородной емкости, способности переходить в активное в отношении сорбции водорода состояние, кинетическим характеристикам сорбции – десорбции и циклической стабильности он уступает наиболее перспективным магниевым сплавам и сплавам редкоземельных металлов [1]. Однако благодаря невысокой стоимости сырья продолжают попытки получить материал с улучшенными сорбционными характеристиками. При этом в качестве сырья используют порошки железа и титана, а в качестве способа получения материала – механическую активацию (МА) синтеза в процессе длительной обработки порошковой смеси в планетарных мельницах.

Интенсивные исследования поведения порошковых смесей железо – титан при механоактивации проводятся с начала 2000-х годов. Было обнаружено [2], что при длительной (до 92 часов) обработке смесей в магнитной вибромельнице SpexMixer/MillModel 8000 происходит полная аморфизация титана и железа. Образования интерметаллических соединений при этом не наблюдалось. Обширные исследования сорбционных свойств материалов, полученных механоактивацией порошковых смесей железа и титана, выполнены А.В. Задорожным с сотрудниками [3–8]. Для механоактивации использовали планетарную мельницу АГО-2S, обработку вели в среде аргона при скорости вращения 840 об/мин. Фазовый состав продуктов механосинтеза зависел от дисперсности порошков титана и железа. При использовании

крупных порошков (280 и 450 мкм) и времени обработки 120 минут образования интерметаллидов не наблюдалось [3]. При использовании мелкого (5–10 мкм) порошка титана продукт обработки эквиатомной смеси в течение 30 минут при той же интенсивности (840 об/мин) состоял из однофазного FeTi [8]. Такой результат не согласуется с результатами работы [2], в которой интерметаллид не образовывался даже после 92-часовой обработки в мельнице SpexMixer/Millmod 8000. Авторы [8] объясняют причину такого несоответствия малой интенсивностью МА в мельнице, использованной в [2]. Образцы из спрессованного однофазного порошка FeTi с нанокристаллической структурой в процессе термоциклирования в среде водорода сохраняют форму и не разрушаются благодаря образованию мостиков, скрепляющих смежные частицы [4, 7]. С целью улучшения сорбционных свойств FeTi, полученного интенсивной МА, в смесь титана и железа вводили различные порошковые добавки: 20 ат. % Al или 6 ат. % Cr [6]; 1 ат. % S или 2 ат. % Mg [5]. Показано, что эти добавки улучшают сорбционные характеристики: упрощение процедуры активации поглощения водорода, уменьшение давления участка плато.

Как следует из краткого обзора [9], сплавы для хранения водорода на основе магния и редкоземельных металлов, так же как FeTi, имеют улучшенные сорбционные характеристики в нанокристаллическом состоянии. Наряду с механоактивацией для получения нанокристаллических интерметаллидов системы железо – титан предпринимаются попытки использовать другие способы, в частности интенсивную пластическую деформацию порошковых смесей в наковальне Бриджмена [10]. Для создания нанокристаллической структуры представляется перспективным интенсивный помол порошка соединения FeTi, предварительно полученного литьем или по порошковым технологиям.

Наиболее технологически простым способом получения интерметаллидов является синтез в порошковых смесях железо – титан составов, соответствующих двойным интерметаллидам [11, 12]. Этот синтез может реализоваться либо непосредственно в процессе механоактивации [12], либо при последующей инициации реакции в механоактивированных смесях [13, 14]. В работе [15] соединения FeTi и Fe₂Ti были полу-

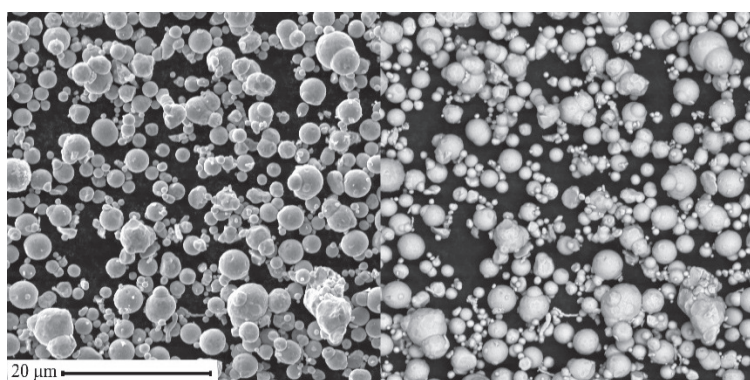
ченны из порошковых смесей соответствующих составов. Поскольку смеси не подвергались предварительной механоактивации, то инициировать синтез в волновом режиме удалось только с предварительным подогревом прессовок до температур выше 700 °С. В работе [16] смеси, соответствующие составам двойных интерметаллидов, подвергали кратковременной (до 10 минут) интенсивной МА с последующим быстрым (около 300 град/мин) нагревом. Реакция синтеза в режиме теплового взрыва инициировалась в интервале 450–500 °С в зависимости от времени МА и состава смесей. В работе [17] смесь Fe – 20 % Ti обрабатывали в течение 4 и 20 минут в планетарной мельнице при интенсивности, близкой к использованной в [16]. Образования интерметаллидов не обнаружили даже при отжиге МА-смеси при температуре 500 °С. Возможная причина различия результатов работ [16] и [17] – разная скорость нагрева МА-смесей. При быстром нагреве не происходит отравления реакционной поверхности продуктами реакционной диффузии на стадии медленного нагрева до температуры отжига и реакция синтеза происходит в режиме теплового взрыва.

Таким образом, проблема отработки технологических режимов механоактивации порошковых смесей и последующего синтеза однофазных интерметаллидов системы титан – железо остается нерешенной. В настоящей работе была

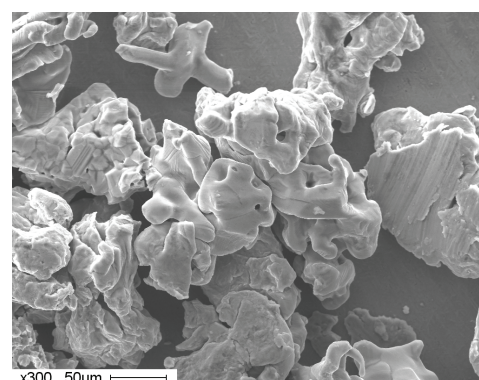
поставлена задача исследовать фазовый состав продуктов синтеза в механоактивированных порошковых смесях титана и железа, а также выявить возможность получения однофазных двойных интерметаллидов. Были использованы два состава, соответствующие соединениям FeTi и Fe₂Ti. Интерметаллид Fe₂Ti также представляет практический интерес как материал, обладающий магнитными свойствами [18].

Методика исследований

Реакционные смеси готовили из порошка титана дисперсностью меньше 160 мкм и порошка железа дисперсностью меньше 5 мкм. Морфология порошков приведена на рис. 2. Навески порошков массой по 15 г смешивали 4 часа в смесителе и помещали в барабаны планетарной мельницы Activator 2S. Для предотвращения налипания порошков на шары и стенки в каждый барабан вводили по 0,5 см³ спирта. Механоактивацию проводили при скорости вращения барабанов 755 об/мин (центробежное ускорение 40g). Соотношение масс шаров диаметром 6 мм и реакционной смеси было равно 20. Суммарное время механоактивации для всех смесей было постоянным – 20 минут. Для предотвращения перегрева через 10 минут вращение останавливали на 10 минут для охлаждения барабанов проточной водой. Механоактивированные смеси насы-



а



б

Рис. 2. РЭМ-изображения морфологии исходных порошков:

а – железо ВМ* (слева – в обратно-рассеянных электронах, справа – во вторичных электронах); б – титан ТПП-8**

Fig. 2. SEM images of the initial powders morphology:

а – VM iron* (left side of the photo – back scattered electron image (BSE), right one – secondary electron image (SE)); б – TPP-8 titanium**

* ТУ 6-09-2227-81 «Железо металлическое восстановленное» / TC 6-09-2227-81 «Reduced metallic iron»

** ТУ 1791-449-05785388-99 «Титан пористый, порошок» / TC 1791-449-05785388-99 «Titanium sponge powder»

пали в цилиндрические титановые контейнеры, слегка уплотняли и помещали в герметичный реактор, конструкция которого описана в [19]. Реактор, непрерывно продуваемый аргоном с расходом 4 л/мин, опускали в печь, предварительно разогретую до 800 °С. Изменение температуры регистрировали автоматически двумя термопарами. Спай одной из термопар был закреплен на внешней стенке реактора и теплоизолирован от теплового излучения печи слоем асбеста. Спай другой термопары помещали в контейнер с реакционной смесью. На автоматически записанных кривых изменения температуры образца регистрировали температуру зажигания T_{ign} и максимальную температуру горения T_{max} . Реактор вынимали из печи после выравнивания температур реактора и образца, которое наступало через 2–4 минуты после прохождения температурного пика, и охлаждали на воздухе. Часть образцов отжигали в вакууме 0,01 Па с вариацией температуры и времени отжига.

Механоактивированные порошковые смеси, продукты горения и последующего отжига исследовали на оборудовании Центра коллективного пользования «Нанотех» ИФПМ СО РАН методом рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-7, «Буревестник», Россия). Идентификацию фаз по результатам рентгеноструктурного анализа проводили с применением базы рентгеновских данных ASTM, а обработку первичных результатов – с использованием программ RENEX и PDWIN.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены термограммы нагрева МА-смесей двух составов со средней скоростью 85 ± 5 град/мин и производные от температуры по времени (скорость увеличения температуры смесей). Видно, что при 500–530 °С происходит скачкообразное повышение температуры как следствие самовоспламенения, т. е. реакция

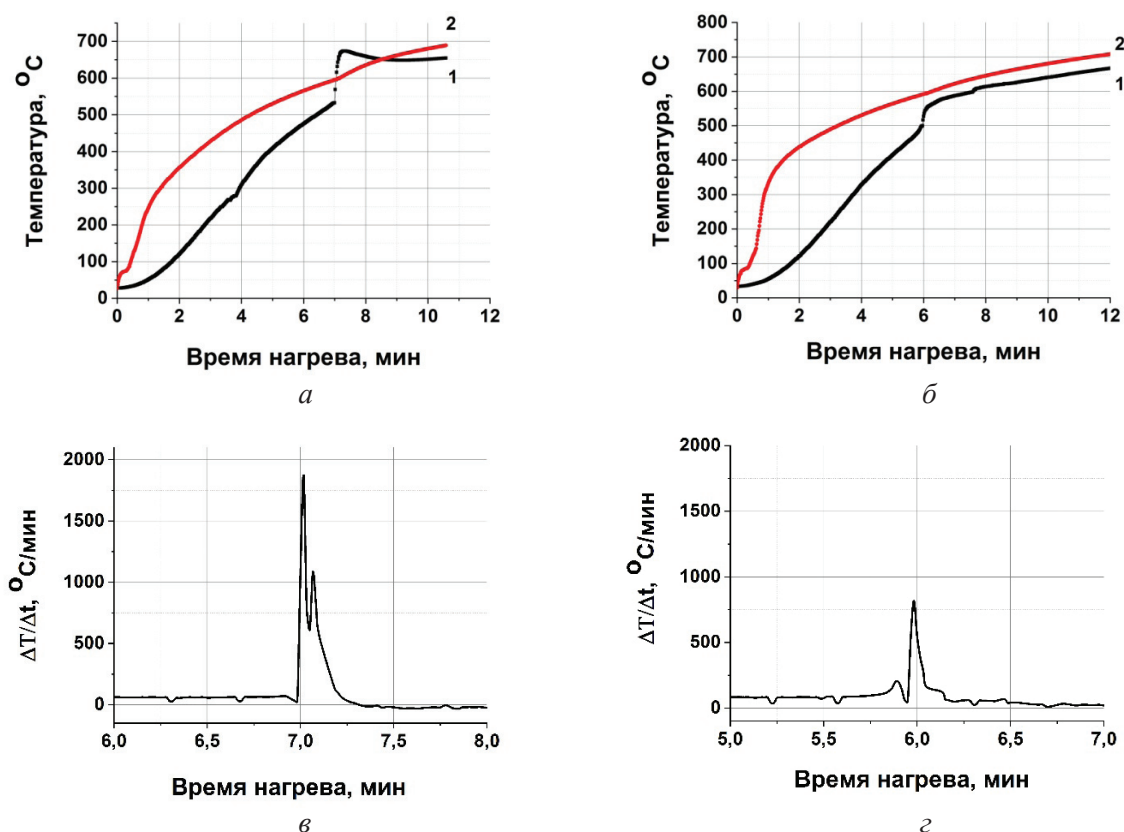


Рис. 3. Термограммы нагрева (а, б) и скорости изменения температуры (в, г) механоактивированных порошковых смесей составов 2Fe+Ti (а, в) и Fe+Ti (б, г):

1 – температура образца; 2 – температура наружной стенки реактора

Fig. 3. Heating thermographs (а, б) and temperature change rates (в, г) of mechanically activated powder mixtures 2Fe+Ti (а, в) and Fe+Ti (б, г):

1 – the sample temperature; 2 – temperature of the outer surface of the reactor

идет в режиме теплового взрыва (ТВ) (рис. 3, а, б). Длительность нагрева до самовоспламенения составляла 6–7 минут. Скорость подъема температуры после воспламенения и пиковое значение для смеси состава 2Fe+Ti оказалось значительно выше (рис. 3, а, в), чем для смеси эквиатомного состава (рис. 3, б, з). Причиной является вдвое большая отрицательная величина энтальпии образования соединения Fe_2Ti по сравнению с таковой для FeTi: –87,45 и –40,58 ккал/моль соответственно [20].

Согласно результатам рентгенофазового анализа (рис. 4, табл. 1) в результате 20 минут обработки смесей при выбранной интенсивности фазовый состав смесей остается неизменным, т. е. механосинтез интерметаллидов не проходит. В продуктах теплового взрыва определяется небольшое (на уровне чувствительности метода) содержание интерметаллидов. При этом соединение Fe_2Ti присутствует также и в продуктах горения состава Fe+Ti в количестве, примерно равном содержанию целевого соединения FeTi.

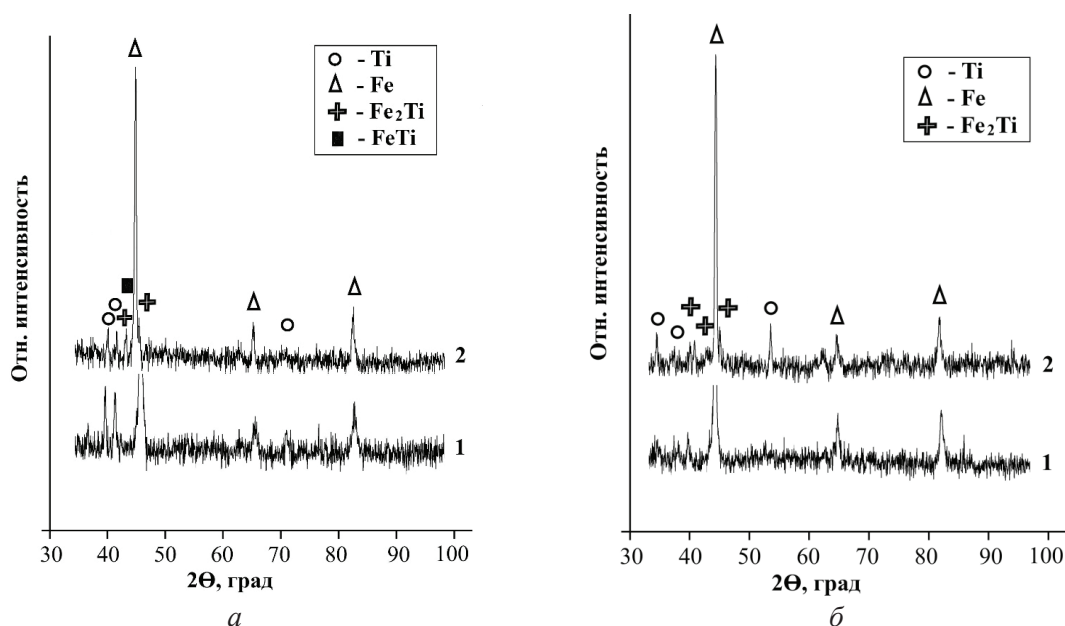


Рис. 4. Рентгенограммы механоактивированных смесей (1) и продуктов теплового взрыва (2) в смесях составов Fe+Ti (а) и 2Fe+Ti (б)

Fig. 4. X-ray patterns of mechanically activated mixtures (1) and thermal explosion products (2) in Fe+Ti (a) and 2Fe+Ti (b) mixtures

Таблица 1

Table 1

Фазовый состав механоактивированных смесей и продуктов теплового взрыва

Phase composition of the mechanically activated (MA) mixtures and the thermal explosion (TE) products

Состав смеси / Mixture composition	Обработка смеси / Mixture treatment	Объемное содержание фаз, % / Volume content of phases, %			
		Fe (6-696)	Ti (5-682)	FeTi (19-636)	Fe_2Ti (15-336)
Fe+Ti	MA MA	70,7	29,3	—	—
Fe+Ti	MA + TB MA + TE	71,4	12,9	6,6	9,1
2Fe+Ti	MA MA	75,1	18,7	—	6,2
2Fe+Ti	MA + TB MA + TE	72,0	23,1	—	4,9

Этот факт согласуется с термограммами теплового взрыва (рис. 3). По-видимому, именно образование Fe_2Ti , обладающее большой отрицательной энтальпией, является причиной слабо выраженного теплового взрыва в смеси состава $\text{Fe}+\text{Ti}$.

Поскольку синтез в условиях теплового взрыва в МА-смесях дает незначительный объем целевых продуктов, то порошковые смеси обоих составов (в том числе без предварительной МА), а также продукты теплового взрыва были отожжены в вакууме с целью установить технологические режимы (температуру и время), обеспечивающие максимальный выход целевых продуктов. Результаты определения фазового состава после отжига приведены в табл. 2. Из-за наложения линий разных фаз количественное определение содержания фаз затруднено, поэтому в таблице указаны ориентировочные данные, из которых однозначно следует, что интерметаллид Fe_2Ti является

основной фазой во всех случаях независимо от состава смесей и режима термообработки. Однако добиться однофазного состояния Fe_2Ti в отожженных механоактивированных смесях $2\text{Fe}+\text{Ti}$ нам не удалось. После отжига остается значительное количество непрореагировавшего железа, что можно объяснить достаточно широкой областью гомогенности соединения Fe_2Ti (рис. 1). В отожженных смесях состава $\text{Fe}+\text{Ti}$ фаза Fe_2Ti также является основной, в то время как содержание целевой фазы FeTi не превышает 7,9 %.

Мы предположили, что одной из причин многофазности продуктов отжига может быть то, что механоактивированные смеси отжигались в свободной насыпке. Чтобы увеличить удельную реакционную поверхность, механоактивированные смеси прессовали, а прессовки подвергали высокотемпературному диффузионному отжигу при таком же режиме, как и смеси в свободной насыпке.

Таблица 2

Table 2

Фазовый состав механоактивированных смесей после дополнительного отжига в вакууме в зависимости от степени уплотнения

Phase composition of mechanically activated mixtures after additional annealing in vacuum depending on the degree of compaction

Состав смеси / Mixture composition	Режимы уплотнения и термообработки МА-смеси / Modes of compaction and heat treatment of MA mixture		Объемное содержание фаз, % / Volume content of phases, %					
	Уплотнение / Compaction	Термообработка / Heat treatment	Fe_2Ti (15-336)	FeTi (19-636)	Fe (6-696)	Ti (5-682)	$\text{TiN}_{0.9}$ (31-1403)	?
$2\text{Fe}+\text{Ti}$	Свободная насыпка / Loose mixture	1000 °C, 1 час / 1000 °C, 1 hour	73,3	2,2	24,5	—	—	—
		1150 °C, 2 часа / 1150 °C, 2 hours	74,5	4,8	20,7	—	—	—
		1250 °C, 2 часа / 1250 °C, 2 hours	73,2	3,1	23,7	—	—	—
	Прессовка / Compacted sample	1250 °C, 2 часа / 1250 °C, 2 hours	84	—	16	—	—	—
$\text{Fe}+\text{Ti}$	Свободная / насыпка Loose mixture	1000 °C, 1 час / 1000 °C, 1 hours	89,5	7,9	—	0,7	—	1,9
		1150 °C, 2 часа / 1150 °C, 2 hours	83,4	4,5	—	—	7,4	4,7
		1250 °C, 2 часа / 1250 °C, 2 hours	84,0	1,1	—	6,8	4,5	1,6
	Прессовка / Compacted sample	1250 °C, 2 часа / 1250 °C, 2 hours	85	15	—	—	—	—

Фазовый состав отожженных прессовок (табл. 2) отличается от фазового состава смесей в свободной насыпке отсутствием неуставленных фаз, непрореагировавшего титана и нитрида титана, небольшое содержание которых определяется в отожженных смесях. Однако качественных изменений фазового состава не произошло. Интерметаллид Fe_2Ti остался основной фазой в прессовках обоих составов. При этом содержание целевых фаз увеличилось за счет уменьшения содержания непрореагировавшего железа (для состава $2\text{Fe}+\text{Ti}$) и побочных фаз (для состава $\text{Fe}+\text{Ti}$).

Выводы

В механоактивированных порошковых смесях составов, соответствующих двойным интерметаллидам Fe_2Ti и FeTi , при нагреве идут экзотермические реакции, вызывающие подъем температуры и образование небольшого количества интерметаллидов.

При использованных в работе режимах механоактивации смесей и последующего отжига не удается получить однофазные интерметаллиды.

Преимущественное образование соединения Fe_2Ti объясняется термодинамическим стимулом: отрицательная энтальпия образования Fe_2Ti вдвое больше, чем у соединения FeTi .

Список литературы

1. Sandrock G. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1999. – Vol. 293–295. – P. 877–888. – DOI: 10.1016/S0925-8388(99)00384-9.
2. Delogu F., Cocco G. Compositional effects on the mechanochemical synthesis of Fe–Ti and Cu–Ti amorphous alloys by mechanical alloying // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2003. – Vol. 352, iss. 1. – P. 92–98. – DOI: 10.1016/S0925-8388(02)01109-X.
3. Zadorozhnyi V.Yu., Skakov Yu.A., Milovzorov G.S. Appearance of metastable states in Fe–Ti and Ni–Ti systems in the process of mechanochemical synthesis // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2008. – Vol. 50, iss. 7. – P. 404–410. – DOI: 10.1007/s11041-008-9078-4.
4. Hydrogen storage nanocrystalline TiFe intermetallic compound: synthesis by mechanical alloying and compacting / V. Zadorozhnyi, S. Klyamkin, M. Zadorozhnyi, O. Bermesheva, S. Kaloshkin // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2012. – Vol. 37, iss. 22. – P. 17131–17136. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.078.
5. Mechanical alloying of nanocrystalline intermetallic compound TiFe doped with sulfur and magnesium / V.Yu. Zadorozhnyi, S.N. Klyamkin, M.Yu. Zadorozhnyi, M.V. Gorshenkov, S.D. Kaloshkin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 615. – P. S569–S572. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.12.144.
6. Mechanical alloying of nanocrystalline intermetallic compound TiFe doped by aluminum and chromium / V.Yu. Zadorozhnyi, S.N. Klyamkin, M.Yu. Zadorozhnyi, O.V. Bermesheva, S.D. Kaloshkin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 586. – P. S56–S60. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.01.138.
7. Effect of mechanical activation on compactibility of metal hydride materials / V.Yu. Zadorozhnyi, S.N. Klyamkin, M.Yu. Zadorozhnyi, D.V. Strugova, G.S. Milovzorov, D.V. Louzguine-Luzgin, S.D. Kaloshkin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 707. – P. 214–219. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.11.320.
8. Preparation and hydrogen storage properties of nanocrystalline TiFe synthesized by mechanical alloying / V.Yu. Zadorozhnyi, G.S. Milovzorov, S.N. Klyamkin, M.Yu. Zadorozhnyi, D.V. Strugova, M.V. Gorshenkov, S.D. Kaloshkin // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2017. – Vol. 27, iss. 1. – P. 149–155. – DOI: 10.1016/j.pnsc.2016.12.008.
9. Zaluski L., Zaluska A., Ström-Olsen J.O. Nanocrystalline metal hydrides // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1997. – Vol. 253–254. – P. 70–79. – DOI: 10.1016/S0925-8388(96)02985-4.
10. Dobromyslova A.V., Taluts N.I. Mechanical alloying of Ti–Fe alloys using severe plastic deformation by high-pressure torsion // *Physics of Metals and Metallography*. – 2018. – Vol. 119, N 11. – P. 1127–1132. – DOI: 10.1134/S0031918X18110030.
11. Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетку. – М.: Физматлит, 2013. – 399 с. – ISBN 978-5-9221-1441-7.
12. Григорьева Т.Ф., Баринев А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез интерметаллических соединений // *Успехи химии*. – 2001. – Т. 70 (1). – С. 52–71.
13. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 303 с.
14. Ляхов Н.З., Талако Т.Л., Григорьева Т.Ф. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 168 с.
15. Прибытков Г.А., Семенова А.А., Итин В.И. Синтез в режиме горения интерметаллидов системы железо – титан // *Физика горения и взрыва*. – 1984. – № 5. – С. 21–23.



16. Влияние механической активации на высокотемпературный синтез и фазообразование низкокалорийных интерметаллических соединений / Ю.С. Найбороденко, Н.Г. Касацкий, Е.Г. Сергеева, О.К. Лепакова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – С. 199–204.

17. Morphological characteristics of mechanochemically synthesized Fe/Ti composites / T.F. Grigor'eva, S.A. Kovaleva, T.Yu. Kiseleva, S.V. Vosmerikov, E.T. Devyatkina, E.A. Pastukhov, N.Z. Lyakhov // Russian Metallurgy (Metally). – 2016. – Vol. 2016, N 8. – P. 737–741. – DOI: 10.1134/S0036029516080048.

18. *Saito T.* Magnetic properties of Ti–Fe alloy powders prepared by mechanical grinding // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – Vol. 364, iss. 1. – P. 113–116. – DOI: 10.1016/S0925-8388(03)00532-2.

19. *Bukrina N.V., Baranovskiy A.V.* Synthesis of composites made of powder mixtures (Ti, C, and Al) in controlled heating // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2019. – Vol. 60, iss. 4. – P. 732–739. – DOI: 10.1134/S0021894419040187.

20. *Bartin I., Knacke O., Kubashevski O.* Thermochemical properties of inorganic substances. Supplement. – Berlin: Springer-Verlag, 1977. – 861 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-02293-1.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Synthesis of Ti–Fe intermetallic compounds from elemental powders mixtures

Gennady Pribytkov^{a, *}, Anton Baranovskiy^b, Victoria Korzhova^c, Irina Firsina^d, Vladimir Krivopalov^e

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8267-971X>, gapribyt@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8800-4716>, nigalisha@gmail.com,
^c <https://orcid.org/0000-0003-0835-9264>, vicvic5@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2253-0582>, iris1983@yandex.ru,
^e <https://orcid.org/0009-0003-3224-1749>, krivopalov@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 May 2023
 Revised: 23 May 2023
 Accepted: 21 June 2023
 Available online: 15 September 2023

Keywords:

Powder mixture
 Mechanical activation of synthesis
 Thermal explosion
 Titanium-Iron intermetallic compounds
 Phase composition
 Enthalpy of compounds formation

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation (project number 23-29-00106): “In situ synthesis of metal matrix composites with submicron carbide strengthening phase”.

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Intermetallic compounds Fe_2Ti and $FeTi$ are of practical application as hydrogen accumulators ($FeTi$) or as magnetic materials (Fe_2Ti). Due to the peculiarities of the double equilibrium diagram, the production of these intermetallic compounds by casting is difficult. Therefore, powder metallurgy methods are widely used combined with preliminary mechanical activation of the powder mixtures. **The aim of the work** is to investigate the possibility of obtaining single-phase compounds from powder mixtures of titanium and iron of target compositions. **Research methods.** Mechanically activated powder mixtures, products of combustion and subsequent annealing were studied by X-ray phase analysis, optical metallography, and scanning electron microscopy using elemental composition determination by energy-dispersive X-ray spectroscopy. **Research methodology.** Powder mixtures were mechanically activated for 20 minutes in an *Activator 2S* planetary ball mill with an intensity of 40 g and a ball/mixture ratio of 20. The mechanically activated mixtures were heated in a sealed reactor in argon media at an average rate of 85 °C/min. **Results and discussion.** At a temperature of about 500 °C, thermographs of thermocouples placed in a mechanically activated mixture showed a sharp rise (thermal explosion), indicating an exothermic reaction in the mixture. The rise for the $2Fe + Ti$ composition turned out to be more pronounced than that for the $Fe + Ti$ composition. X-ray diffraction analysis showed that the main reaction product is the Fe_2Ti compound for both mixtures. The predominant formation of Fe_2Ti is explained by the greater negative enthalpy of Fe_2Ti formation of compared to $FeTi$ (–87.45 and –40.58 kcal/mol, respectively). **Conclusion.** High-temperature annealing of thermal explosion products did not make it possible to obtain single-phase target products. The content of secondary phases and unreacted reagents changed little after annealing. Based on the obtained results, it was concluded that the thermodynamic factor (the enthalpy of formation of the intermetallic compound) is the main one that determines the phase composition of the synthesis products in powder mixtures of titanium and iron.

For citation: Pribytkov G.A., Baranovskiy A.V., Korzhova V.V., Firsina I.A., Krivopalov V.P. Synthesis of Ti–Fe intermetallic compounds from elemental powders mixtures. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 126–136. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-126-136. (In Russian).

References

1. Sandrock G. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view. *Journal of Alloys and Compounds*, 1999, vol. 293–295, pp. 877–888. DOI: 10.1016/S0925-8388(99)00384-9.

* Corresponding author

Pribytkov Gennady A., Ph.D. (Engineering),
 Associate Professor, General Researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Science
 of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
 2/4 pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (913) 860-04-49, e-mail: gapribyt@mail.ru



2. Delogu F., Cocco G. Compositional effects on the mechanochemical synthesis of Fe–Ti and Cu–Ti amorphous alloys by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, vol. 352, iss. 1, pp. 92–98. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)01109-X.
3. Zadorozhnyi V.Yu., Skakov Yu.A., Milovzorov G.S. Appearance of metastable states in Fe–Ti and Ni–Ti systems in the process of mechanochemical synthesis. *Metal Science and Heat Treatment*, 2008, vol. 50, iss. 7, pp. 404–410. DOI: 10.1007/s11041-008-9078-4.
4. Zadorozhnyy V., Klyamkin S., Zadorozhnyy M., Bermesheva O., Kaloshkin S. Hydrogen storage nanocrystalline TiFe intermetallic compound: synthesis by mechanical alloying and compacting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, iss. 22, pp. 17131–17136. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.078.
5. Zadorozhnyy V.Yu., Klyamkin S.N., Zadorozhnyy M.Yu., Gorshenkov M.V., Kaloshkin S.D. Mechanical alloying of nanocrystalline intermetallic compound TiFe doped with sulfur and magnesium. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 615, pp. S569–S572. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.12.144.
6. Zadorozhnyy V.Yu., Klyamkin S.N., Zadorozhnyy M.Yu., Bermesheva O.V., Kaloshkin S.D. Mechanical alloying of nanocrystalline intermetallic compound TiFe doped by aluminum and chromium. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 586, pp. S56–S60. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.01.138.
7. Zadorozhnyy V.Yu., Klyamkin S.N., Zadorozhnyy M.Yu., Strugova D.V., Milovzorov G.S., Louzguine-Luzgin D.V., Kaloshkin S.D. Effect of mechanical activation on compactibility of metal hydride materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 707, pp. 214–219. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.11.320.
8. Zadorozhnyy V.Yu., Milovzorov G.S., Klyamkin S.N., Zadorozhnyy M.Yu., Strugova D.V., Gorshenkov M.V., Kaloshkin S.D. Preparation and hydrogen storage properties of nanocrystalline TiFe synthesized by mechanical alloying. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, vol. 27, iss. 1, pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.pnsc.2016.12.008.
9. Zaluski L., Zaluska A., Ström-Olsen J.O. Nanocrystalline metal hydrides. *Journal of Alloys and Compounds*, 1997, vol. 253–254, pp. 70–79. DOI: 10.1016/S0925-8388(96)02985-4.
10. Dobromyslova A.V., Taluts N.I. Mechanical alloying of Ti–Fe alloys using severe plastic deformation by high-pressure torsion. *Physics of Metals and Metallography*, 2018, vol. 119, no. 11, pp. 1127–1132. DOI: 10.1134/S0031918X18110030.
11. Rogachev A.S., Mukas'yan A.S. *Gorenie dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for the synthesis of materials: an introduction to structural macrokinetics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 399 p. ISBN 978-5-9221-1441-7.
12. Grigorieva T.F., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. Mechanochemical synthesis of intermetallic compounds. *Russian Chemical Reviews*, 2001, vol. 70, iss. 1, pp. 45–63. DOI: 10.1070/RC2001v070n01ABEH000598. Translated from *Uspekhi khimii*, 2001, vol. 70 (1), pp. 52–71.
13. Avvakumov E.G. *Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods of activation of chemical processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 303 p.
14. Lyakhov N.Z., Talako T.L., Grigor'eva T.F. *Vliyanie mekhanoaktivatsii na protsessy fazo- i strukturoobrazovaniya pri samorasprostranyayushchemsya vysokotemperaturnom sinteze* [Influence of mechanical activation on the processes of phase and structure formation during self-propagating high-temperature synthesis]. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2008. 168 p.
15. Pribytkov G.A., Semenova A.A., Itin V.I. Sintez v rezhime gorenija intermetallidov sistemy zhelezo – titan [Synthesis of intermetallic compounds of the iron – titanium system in the combustion mode]. *Fizika gorenija i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1984, no. 5, pp. 21–23. (In Russian).
16. Naiborodenco Ju.S., Kasatskii N.G., Sergeeva E.G., Lepakova O.K. *Vliyanie mekhanicheskoi aktivatsii na vysokotemperaturnyi sintez i fazoobrazovanie nizkokaloriinykh intermetallicheskikh soedinenii* [Influence of mechanical activation on high-temperature synthesis and phase formation of low-calorie intermetallic compounds]. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*, 2002, vol. 10 (1–2), pp. 199–204. (In Russian).
17. Grigor'eva T.F., Kovaleva S.A., Kiseleva T.Yu., Vosmerikov S.V., Devyatkina E.T., Pastukhov E.A., Lyakhov N.Z. Morphological characteristics of mechanochemically synthesized Fe/Ti composites. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 2016, no. 8, pp. 737–741. DOI: 10.1134/S0036029516080048.

18. Saito T. Magnetic properties of Ti–Fe alloy powders prepared by mechanical grinding. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 364, iss. 1, pp. 113–116. DOI: 10.1016/S0925-8388(03)00532-2.
19. Bukrina N.V., Baranovskiy A.V. Synthesis of composites made of powder mixtures (Ti, C, and Al) in controlled heating. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, iss. 4, pp. 732–739. DOI: 10.1134/S0021894419040187.
20. Bardin I., Knacke O., Kubashevski O. Thermochemical properties of inorganic substances. Supplement. Berlin, Springer-Verlag, 1977. 861 p. DOI: 10.1007/978-3-662-02293-1.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний полимерного композита на основе переплетенных обработанных волокон джута

Савендра Сингх ^{a, *}, Четан Хирвани ^b

Национальный технологический институт Патны, Патна, Бихар, 800005, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5151-0284>,  savendrasingh123@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4291-4575>,  chetank.me@nitp.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678

История статьи:

Поступила: 20 июня 2023
Рецензирование: 30 июня 2023
Принята к печати: 10 июля 2023
Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Натуральное волокно
ИКФС
Поверхностная обработка
Собственная частота
Затухание колебаний
Свободная вибрация
СЭМ (РЭМ)

Благодарности

Авторы очень благодарны руководству Инженерного колледжа Райкия (Азамгарх) за предоставленную лабораторию для проведения исследовательской работы.

АННОТАЦИЯ

Введение. В последнее время существенно увеличилось использование натуральных волокон – они эффективно заменяют синтетические, что благотворно влияет на окружающую среду, так как упрощается процесс утилизации отходов. Однако по механическим свойствам натуральные волокна уступают синтетическим. **Цель работы.** В этом исследовании рассматривалось влияние обработки поверхностных и более глубоких слоев джутового волокна на механические характеристики и характеристики свободных колебаний композиционного материала на его основе. **Методы исследования.** Благодаря равномерному распределению напряжений в направлениях основы и утка в настоящем исследовании были использованы четырехслойные джутовые волокна корзиночного плетения. **Результат и обсуждение.** Механические свойства и характеристики свободных колебаний композиционных материалов значительно улучшаются, если джутовые волокна предварительно обработать NaOH, поскольку он устраняет слабый компонент матрицы – лингин – и делает волокна более жесткими и прочными. Однако увеличение процентного содержания NaOH и времени выдержки волокон в растворе NaOH мало влияет на эти свойства. Наибольшие значения временного сопротивления и модуля упругости при растяжении составляют $50 \pm 1,17$ МПа и $1,94 \pm 0,23$ ГПа соответственно и характерны для композита на основе джутового волокна корзиночного плетения, обработанного в течение 1 часа. Такая обработка позволяет повысить временное сопротивление и модуль упругости примерно на 12 и 40 % соответственно. Точно так же значения сопротивления разрушению и модуля упругости при изгибе составляют $95 \pm 1,17$ МПа и $3,99 \pm 0,23$ ГПа соответственно и характерны для композита на основе джутового волокна корзиночного плетения, обработанного в течение 1 часа. Полученный таким способом композиционный материал демонстрирует самое высокое значение основной частоты: 77,837 Гц. Наличие связи О-Н в композиционном материале, как показало исследование ИКФС (инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье), придает ему гидрофильный характер и ограничивает использование во влажной среде. Соотношения волокна и матрицы видны на изображениях СЭМ (РЭМ).

Для цитирования: Сингх С.П., Хирвани Ч.К. Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний полимерного композита на основе переплетенных обработанных волокон джута // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 137–151. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-137-151.

Введение

Композиционные материалы на основе натуральных волокон являются хорошей альтернативой композиционным материалам на основе синтетических волокон и находят применение в различных областях, где действуют низкие и средние нагрузки, благодаря их малому весу, низкой стоимости, высокому соотношению

прочности и веса, биоразлагаемости, высокой доступности и другим показателям. Это связано с растущим спросом на материалы с особыми требованиями к свойствам и не загрязняющие окружающую среду. Натуральные волокна обладают лучшими механическими свойствами и характеристиками свободных колебаний в плетеном состоянии. Их свойства улучшаются по мере увеличения количества слоев [1, 2]. В результате армирования динамические механические характеристики композиционных материалов повышаются. Наличие целлюлозы и гемицеллюлозы в ячейках волокна улучшает

*Адрес для переписки

Сингх Савендра Пратап,
Национальный технологический институт Патны
Патна, Бихар, 800005, Индия
Тел.: +91-9455446960, e-mail: savendrasingh123@gmail.com

тепловые характеристики плетеного композита из натуральных волокон [3]. На характеристики коробления плетеного композита из натуральных волокон влияет тип плетения, и они ухудшаются по мере увеличения количества армирующих слоев. Армирование стекловолокном улучшает характеристики композиционных материалов [4]. На механические свойства плетеных композиционных материалов из натуральных волокон также влияет ориентация волокон [5]. М. Мейри (M. Mejr) исследовал использование композиционных материалов из натуральных волокон в производстве зубчатых колес [6–7].

Свойства композиционного материала улучшаются по мере увеличения толщины, что требует новых методов обработки [8–10]. Тидарут Джираваттанасомкул (Tidarut Jirawattanasomkul) и его коллеги изучили применение натурального волокна в бетоне. Натуральные волокна могут использоваться для поглощения звука, поскольку они обладают хорошей акустикой [11]. Нанонаполнители, такие как углеродные нанотрубки, нано-SiO_2 , нано-глина и другие, добавлялись в композит для улучшения его качеств без увеличения его плотности [12]. С. Шри Картикеян (S. Sri Karthikeyan) и его коллеги исследовали использование композита из натуральных волокон в качестве замены асбестовых волокон, пыль от которых оказывает опасное воздействие [13]. Способность натуральных волокон впитывать воду разрушает их. Синтетические волокна могут быть добавлены в композиты из натуральных волокон для дальнейшего улучшения их качества [14, 15]. Функциональная группа, входящая в состав композита, выявляется с помощью ИКФС-анализа [16, 17]. Исследование морфологии поверхности было проведено Ядвиндером Сингхом (Yadvinder Singh) с коллегами, которые пришли к выводу, что волокна, обработанные щелочью, обладают лучшими свойствами по сравнению с необработанными волокнами.

Обзор литературы показывает, что добавление натурального волокна к полимерной матрице (как в виде частиц, коротких и случайных, длинных волокон, так и в плетеной форме) улучшает механические свойства композита, при этом плетеная форма оказывает наиболее положительное влияние на механические свойства [18]. Натуральные волокна снижают горючесть композиционных материалов, а по сравнению

с полиэфирной матрицей матрица из полимолочной кислоты демонстрирует более высокие механические свойства при армировании банановыми и сизалевыми волокнами [19]. Результаты испытаний композитов на основе волокон сизаля и алоэ вера на расслаивание показали, что композит из волокон сизаля расслаивается в меньшей степени и полученные поверхности характеризуются меньшей шероховатостью [20]. Помимо улучшения до определенной степени характеристик композита, добавление волокон также увеличивает процент пустот и водопоглощение в композите [21]. На механические свойства композита из натурального волокна влияет тип плетения и степень водопоглощения [22, 23]. Поскольку добавление нанонаполнителей способствует адгезии между волокном и матрицей и увеличивает межфазный контакт, то заполнение пустот композита наноматериалами улучшает механические свойства и снижает водопоглощение [24]. Комбинирование улучшает характеристики композиционных материалов, а также порядок укладки и обработки поверхности [25, 26]. На характеристики композита влияет количество добавленных слоев, эффект комбинирования, создаваемый между слоями синтетическими волокнами, такими как стекло [27, 28].

Несмотря на то что некоторые исследователи провели обширные исследования различных композитов из натуральных волокон и комбинированных полимерных композитов, ни одно из этих исследований не было признано относящимся к плетеным композитам на основе обработанных натуральных волокон из-за проблем с плетением. Согласно различным академическим источникам, обработанные натуральные волокна обладают лучшими свойствами, чем необработанные. **Цель настоящего исследования** состоит в том, чтобы подготовить слоистые композиционные материалы, изготовленные из плетеных натуральных волокон и полимеров, и изучить, как обработка поверхности влияет на механические свойства и характеристики свободных колебаний, а также изучить механическое поведение плетеных полимерных композитов и характер свободных колебаний после выдержки в растворе NaOH . Спектр ИКФС был извлечен для анализа функциональной группы в джутовом волокне.

Материалы и методы исследования

Материалы

В качестве армирующего материала в исследовании использовались джутовые волокна, которые были сотканы. Джутовая ткань, когда-то бывшая рыхлой, превратилась в пряжу. В каждой нити имеется от 80 до 120 свободных нитей. Затем, как видно на рис. 1, эти нити были сплетены в конструкцию, напоминающую корзину. Плетеные маты для этого исследования были закуплены у компании Kiran Jute Industry в Каль-

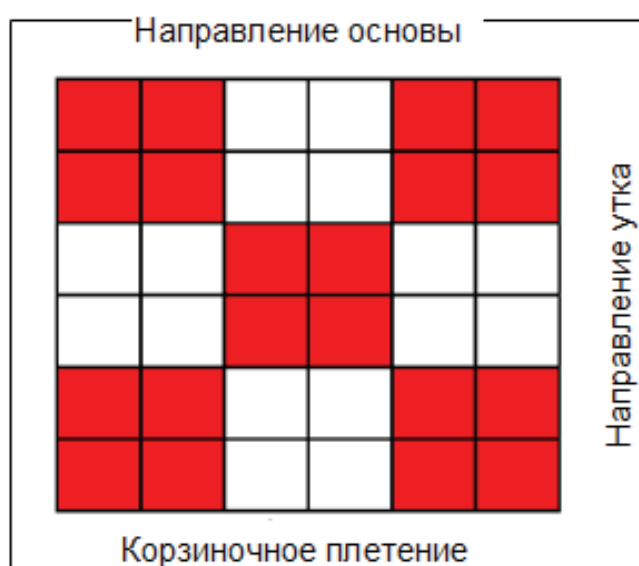


Рис. 1. Корзиночное плетение джутовых волокон

Fig. 1. Basket weave jute fibers

кутте, Западная Бенгалия, Индия. Эпоксидная смола с отвердителем HV953 в соотношении 1:1 использовалась в качестве матричного материала. Компоненты были закуплены у индийской компании Vasavibala Resins Ltd., Ченнаи.

Метод изготовления

Слоистые композиционные материалы изготавливаются с использованием компрессионной формовочной машины. В форму из нержавеющей стали размерами 260×260×4 мм предварительно заливали достаточное количество смолы. Затем внутрь смолы помещали мат корзиночного плетения и с помощью валика смолу распределяли по мату. Процесс повторяли до тех пор, пока не был получен четырехслойный мат, прежде чем заполнить полость рассчитанным количеством смолы. Затем на пресс-формовочной машине прессовали форму, выдерживая ее в течение 1 часа при температуре 80 °С и давлении 150 кгс/см². Полученные слоистые композиционные материалы разрезали для приготовления образцов в соответствии со спецификациями ASTM. На рис. 2 и 3 соответственно показана подготовка композита и установка машины для компрессионного формования.

Согласно стандарту ASTM D-638 испытание на растяжение проводили при скорости испытания 2 мм в минуту. Образец в форме собачьей кости имел следующие размеры: длина 165 мм, калибровочная длина 57 мм и ширина 13 мм. Испытания на изгиб по трехточечной схеме про-

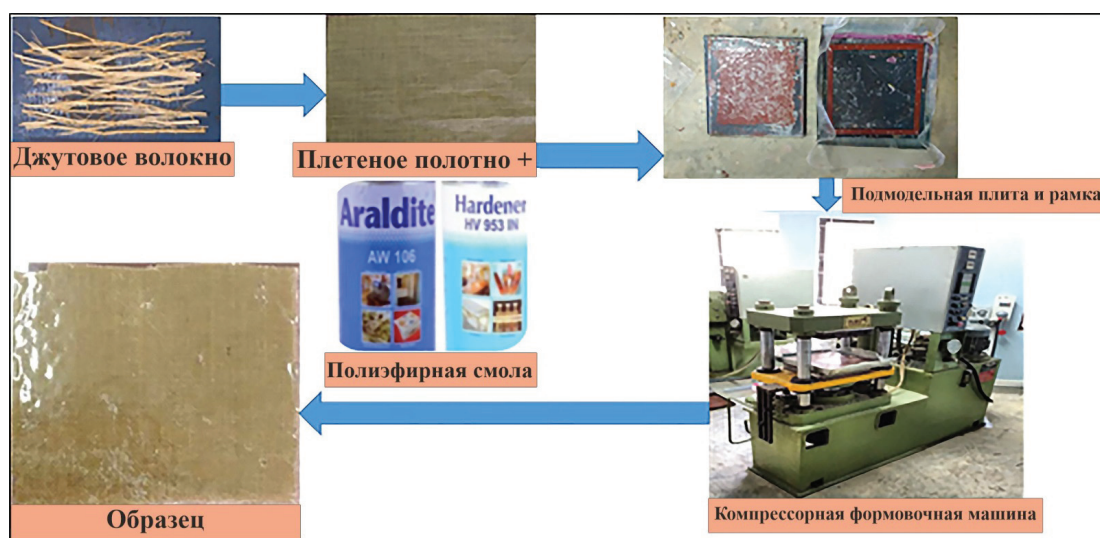


Рис. 2. Схема получения композита

Fig. 2. Composite preparation flow diagram

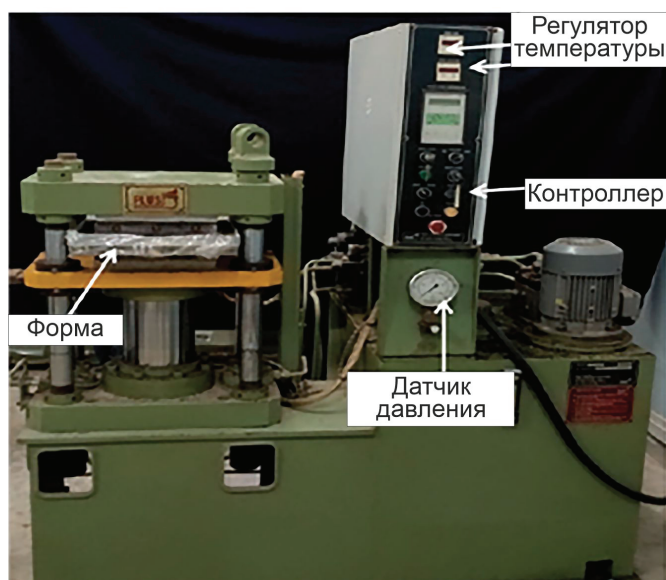


Рис. 3. Экспериментальная установка

Fig. 3. Experimental setup

водили в соответствии со стандартом ASTM D-790 при скорости испытания 1,7 мм в минуту с точностью определения положения 0,001 мм и точностью скорости 0,005 %. Образец изготавливали со стандартными размерами: 127 мм в длину, 12,7 мм в ширину и 4 мм в толщину. При проведении ударного испытания на композитном образце размерами 63,7×12,7×3 мм следовали рекомендациям ASTM D-256 с точностью по углу 0,1°.

Анализ свободных колебаний позволил исследователям лучше понять динамическое поведение композиционных материалов. С использованием экспериментального модального анализа была обнаружена собственная частота и связанный с ней коэффициент затухания композита. Экспериментальный модальный анализ выполнялся с использованием теста ударным молотком, как схематически показано на рис. 4. Для этого анализа были приняты во внимание первые три режима изгиба композита, изготовленного из джутового волокна корзиночного плетения. Исследование свободных колебаний проводилось при свободных граничных условиях. Образец размером 170×17×3 мм был закреплен на жесткой концевой опоре, такой как консольная балка, и с помощью воска над образцом был установлен легкий акселерометр весом 4 г для получения первых трех собственных частот композита на основе плетеного джутового волокна. Использование легкого акселерометра помогло избежать дополнительного воздействия на массу тканого композита. После удара сигнал отправлялся в 8-канальную систему сбора данных DEWE для использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (алгоритма БПФ) с целью преобразования сигнала во временной области в частотную форму. Непосредственные измерения соответствующих значений

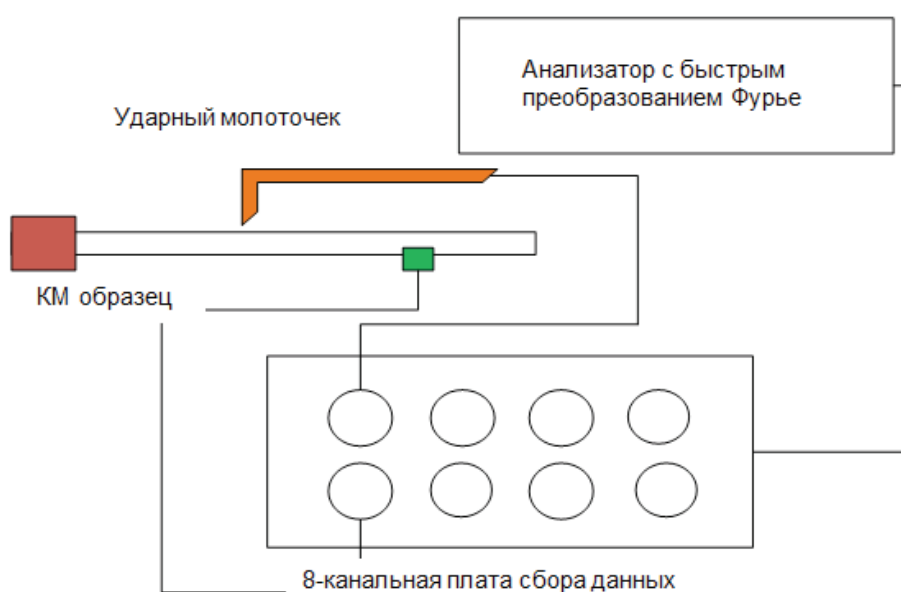


Рис. 4. Экспериментальная установка для изучения собственных колебаний

Fig. 4. Free vibration setup

коэффициента затухания могут быть выполнены с помощью системы сбора данных DEWE. В зависимости от резонансного пика частотной характеристики изначально были четко видны три пика; были извлечены соответствующие этим пикам собственные частоты. По методу аппроксимирующих кругов для расчета коэффициента затухания использовался график Найквиста (nyquist). Метод аппроксимирующих кругов учитывал только несколько мест по соседству с ответом, поэтому пиковая амплитуда мало влияла на результаты. Расположение пика отклика лежит на дуге окружности при использовании метода аппроксимирующих кругов. Рис. 5 иллюстрирует типичный

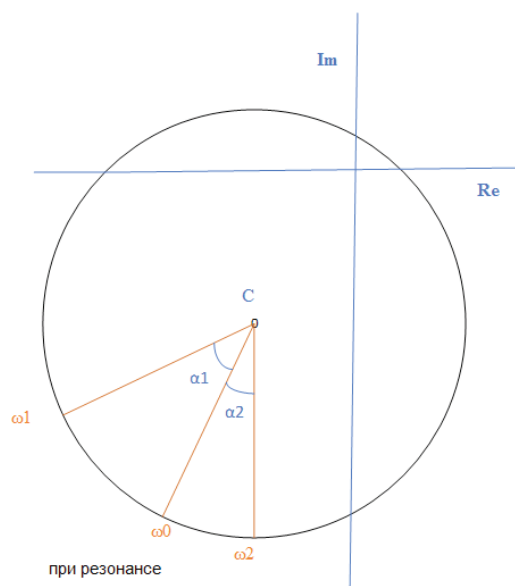


Рис. 5. График Найквиста для метода аппроксимирующих кругов

Fig. 5. Nyquist plot for fitting circle method

график Найквиста, использующий подход круга подгонки. Формула для расчета коэффициента затухания:

$$\zeta = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2\omega_0 \left[\omega_2 \tan \frac{\alpha_2}{2} + \omega_1 \tan \frac{\alpha_1}{2} \right]},$$

где ω_0 – угловая резонансная частота; ω_1, ω_2 – угловые частоты; α_1, α_2 – углы между угловыми частотами.

Результаты и их обсуждение

В настоящем исследовании после получения композиционного материала из него изготовили образцы, масса и размер которых приведены в табл. 1.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что увеличение массы композиционного материала происходит преимущественно из-за увеличения массы смолы. Соответственно в исследованиях композиционных материалов влияние массы обусловлено массой смолы. Для настоящего исследования были выбраны джутовые волокна в четырехслойном корзиночном переплетении из-за их способности равномерно распределять силу как в направлении основы, так и в направлении утка. По мере увеличения количества слоев в композите улучшаются его качества.

Испытание на растяжение

Испытание на растяжение проводили на универсальной разрывной машине для разного процентного содержания NaOH и разного времени

Таблица 1

Table 1

Масса и размер образцов
Weight and Size of specimen

№	Тип (толщина)	Масса, г
1	Однослойный (~4 мм)	16–18
2	Двухслойный (~4 мм)	18–19
3	Трехслойный (~4 мм)	21–22
4	Четырехслойный (~4 мм)	24–25
	Тип испытания	Размер образца
1	На растяжение (ASTM D-638)	30×3 см
2	На изгиб (ASTM D-790)	125×12,7 мм
3	На прочность при ударе (ASTM D-256)	63,5×12,7 мм
4	На свободные колебания	170×17 мм

обработки поверхности волокон. Результаты представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, обработка поверхности улучшает временное сопротивление разрушению при растяжении и модуль упругости примерно на 12 и 40 % соответственно. Из этого можно сделать вывод, что влияние времени выдержки при обработке поверхности волокон раствором NaOH не приводит к значительному улучшению характеристик композиционного материала при растяжении; повышение временного сопротивления разрушению при растяжении настолько минимально, что его можно не заметить. Аналогичные результаты получены при увеличении процентного содержания NaOH. Это указывает на то, что при применении щелочи лигнин и гемицеллюлоза быстро удаляются из волокон.

Очевидно, что самое высокое значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $50 \pm 1,17$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при растяжении – $1,94 \pm 0,23$ ГПа. Второе по величине значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $49 \pm 0,60$ МПа при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при растяжении – $1,90 \pm 0,10$ ГПа. Самое низкое значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $48 \pm 0,61$ МПа при предварительной

обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при растяжении – $1,90 \pm 0,11$ ГПа. Второе и последнее самое низкое значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $48,8 \pm 2,61$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при растяжении – $1,91 \pm 0,18$ ГПа.

Испытание на изгиб

Для изучения прочности на изгиб и модуля изгиба проведено соответствующее испытание, его результаты представлены в табл. 3.

По результатам описанных выше испытаний видно, что поверхностная обработка композиционных материалов повышает их способность к изгибу. Наибольшее значение предела прочности на изгиб и модуля упругости при изгибе было обнаружено при предварительной выдержке в 4%-м растворе NaOH в течение 1 часа. По сравнению с другими результатами результаты с часовой выдержкой в 4%-м растворе щелочи заметно выше. Это может быть вызвано увеличением содержания целлюлозы и максимально возможной адгезией между волокнами и матрицей. Предел прочности на изгиб и изменение модуля упругости не сильно отличаются для трех других комбинаций. Увеличение предела прочности на изгиб и модуля упругости слоистых образцов без предварительной обработки поверхности составляет около 10,40 и 32,24 % соответственно. Таким образом, можно сказать, что обработка

Таблица 2

Table 2

Поведение тканого джутового композита при испытании на растяжение

Tensile test behavior of woven jute composite

Количество слоев	Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки	Временное сопротивление разрушению, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
4	Корзиночное (30 мин, 1 %)	$48 \pm 0,61$	$1,90 \pm 0,11$
	Корзиночное (1 час, 1 %)	$49 \pm 0,60$	$1,90 \pm 0,10$
	Корзиночное (30 мин, 4 %)	$48,8 \pm 2,61$	$1,91 \pm 0,18$
	Корзиночное (1 час, 4 %)	$50 \pm 1,17$	$1,94 \pm 0,23$
Количество слоев	Тип плетения, без выдержки в NaOH	Временное сопротивление разрушению, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
4	Корзиночное	$43,60 \pm 2,3$	$1,15 \pm 0,27$

Таблица 3

Table 3

Поведение тканого джутового композита при испытании на изгиб
Flexural test behavior of woven jute composite

Количество слоев	Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки	Предел прочности на изгиб, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа
4	Корзиночное (30 мин, 1 %)	$70,6 \pm 0,20$	$2,6 \pm 0,11$
	Корзиночное (1 час, 1 %)	$71,7 \pm 0,60$	$3,2 \pm 0,10$
	Корзиночное (30 мин, 4 %)	$70 \pm 0,60$	$2,8 \pm 0,18$
	Корзиночное (1 час, 4 %)	$95 \pm 1,17$	$3,99 \pm 0,23$
Количество слоев	Тип плетения, без выдержки в NaOH	Предел прочности на изгиб, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа
4	Корзиночное	$69,44 \pm 0,60$	$2,38 \pm 0,11$

поверхности значительно улучшает характеристики слоистого материала при его испытании на изгиб.

Очевидно, что самое высокое значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением составляет $95 \pm 1,17$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при изгибе – $3,99 \pm 0,23$ ГПа. Второе по величине значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением составляет $71,7 \pm 0,60$ МПа при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при изгибе – $3,2 \pm 0,10$ ГПа. Самое низкое значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением составляет $70,6 \pm 0,20$ МПа при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при изгибе – $2,6 \pm 0,11$ ГПа. Второе и последнее самое низкое значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением

составляет $70 \pm 0,60$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при растяжении – $2,8 \pm 0,18$ ГПа.

Испытание на прочность при ударе

Испытание на прочность при ударе было проведено на тканом джутовом композите для исследования энергии удара, результаты представлены в табл. 4. Энергия удара по стандарту ASTM измеряется в джоулях на метр (Дж/м) или фут-фунтах на дюйм (фут-фунт/дюйм). Ударная вязкость вычисляется путем деления значения энергии удара (в джоулях или фут-фунтах) на толщину надреза (в миллиметрах или дюймах) образца в среднем для пяти циклов испытаний. Метод ISO немного отличается: ударная вязкость рассчитывается в килоджоулях на кв. метр (кДж/м^2) из энергии удара в джоулях по площади под надрезом. Это испытание проводится на 10 образцах, результаты усредняются.

Таблица 4

Table 4

Испытание на прочность при ударе тканого джутового композита
Impact test of woven jute composite

Количество слоев	Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки	Энергия удара, Дж/м
4	Корзиночное (30 мин, 1 %)	272 ± 23
	Корзиночное (1 час, 1 %)	274 ± 24
	Корзиночное (30 мин, 4 %)	278 ± 25
	Корзиночное (1 час, 4 %)	280 ± 26
Количество слоев	Тип плетения, без выдержки в NaOH	Энергия удара, Дж/м
4	Корзиночное	250 ± 26

Результаты испытания указывают на способность материала накапливать энергию при нагружении. Согласно табл. 4, работа ударного разрушения композита значительно увеличилась после обработки поверхности, примерно на 10 %.

Хорошо видно, что самое высокое значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 280 ± 26 Дж/м при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 1 часа; самое низкое значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 278 ± 25 Дж/м при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут. При предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 274 ± 24 Дж/м, а второе и последнее самое низкое значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 272 ± 23 Дж/м при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут.

Определение собственных колебаний

Результаты испытаний на свободные колебания, проведенных на четырехслойном джутовом композиционном материале с корзиночным плетением предварительно обработанных волокон, представлены в табл. 5.

Из приведенных результатов исследования очевидно, что обработка поверхности улучшает

вибрационные характеристики композита. Кроме того, показано, что изменения колебательных характеристик составляют всего 3 %, что не очень существенно, независимо от повышения концентрации NaOH и продолжительности выдержки волокна в щелочи.

Испытание на свободную вибрацию было проведено на экспериментальной установке. В этом эксперименте были получены три собственные частоты, связанные с коэффициентом затухания с помощью аппроксимирующего круга.

Первая мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут найдена как 75,493, 422,72, 1387,0 и связана с коэффициентом затухания 0,06224, 0,024813, 0,044182.

Вторая мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут найдена как 75,81, 427,06, 909,0 и связана с коэффициентом затухания 0,0468, 0,0500, 0,04479.

Третья мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа найдена как 76,55, 484,78, 1200 и связана с коэффициентом затухания 0,068, 0,066, 0,0706.

Последняя мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение

Таблица 5

Table 5

Результаты испытаний на свободные колебания

Free vibration test results

Количество слоев	Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки	Свободное граничное условие (собственные колебания (Гц) и соответствующий коэффициент затухания)		
4	Корзиночное (30 мин, 1 %)	75,493 0,06224	422,72 0,024813	1387,0 0,044182
	Корзиночное (1 час, 1 %)	75,81 0,0468	427,06 0,0500	909,0 0,04479
	Корзиночное (30 мин, 4 %)	76,55 0,068	484,78 0,066	1200 0,0706
	Корзиночное (1 час, 4 %)	77,837 0,055	494,30 0,038071	806 0,0377
Количество слоев	Тип плетения, без выдержки в NaOH	Свободное граничное условие (собственные колебания (Гц) и соответствующий коэффициент затухания)		
4	Корзиночное	68,4 0,0455	410,2 0,0353	1079,1 0,0364

1 часа найдена как 77,837, 494,30, 806 и связана с коэффициентом затухания 0,055, 0,038071, 0,0377.

ИКФС-анализ

ИКФС-анализ был проведен для исследования функциональной группы в композите. Для ИКФС-анализа использовали образец в виде порошка; полученные данные отражены на графике (рис. 6).

Пик в области $650\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о наличии одинарных и двойных связей углерода с азотом, углеродом и кислородом согласно сравнению приведенного графика ИКФС со стандартным графиком. Пики в диапазоне 3000 см^{-1} указывают на наличие функциональной группы О-Н, которая придает композитам их гидрофильный характер. Этот композит впитывает влагу, что ограничивает его использование в ситуациях, когда люди подвергаются воздействию воды.

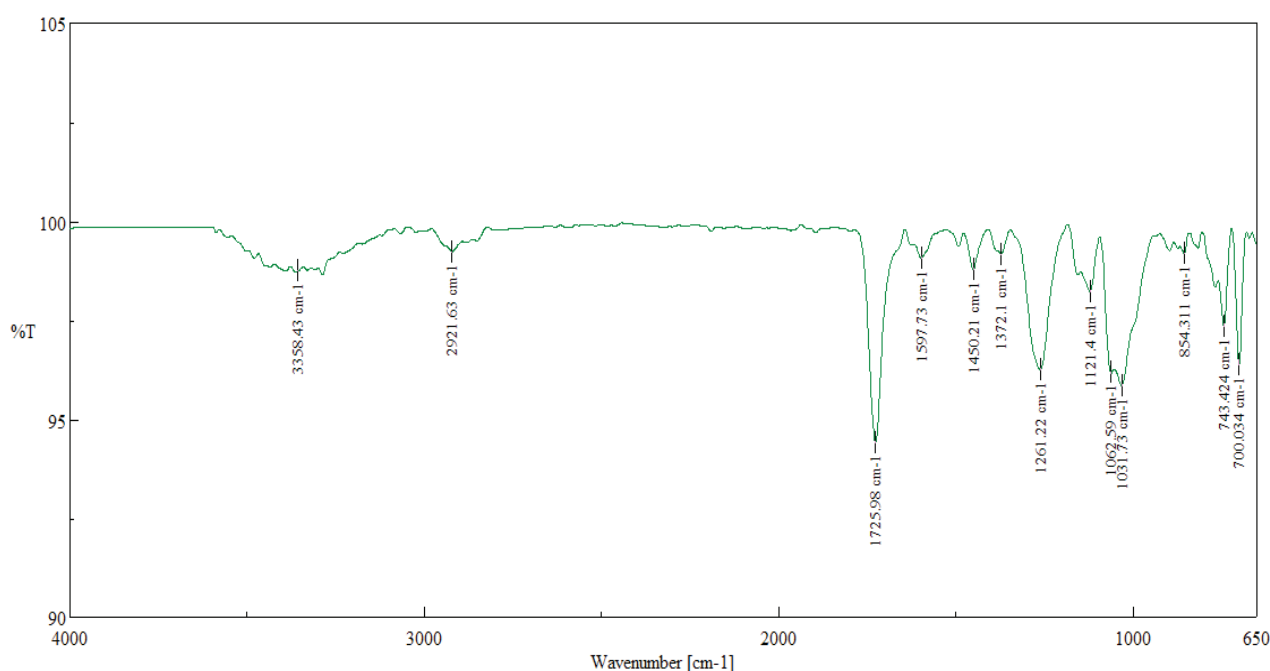


Рис. 6. Композиционный материал с корзиночным плетением при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа

Fig. 6. Basket type 1% NaOH with one-hour soaking time duration

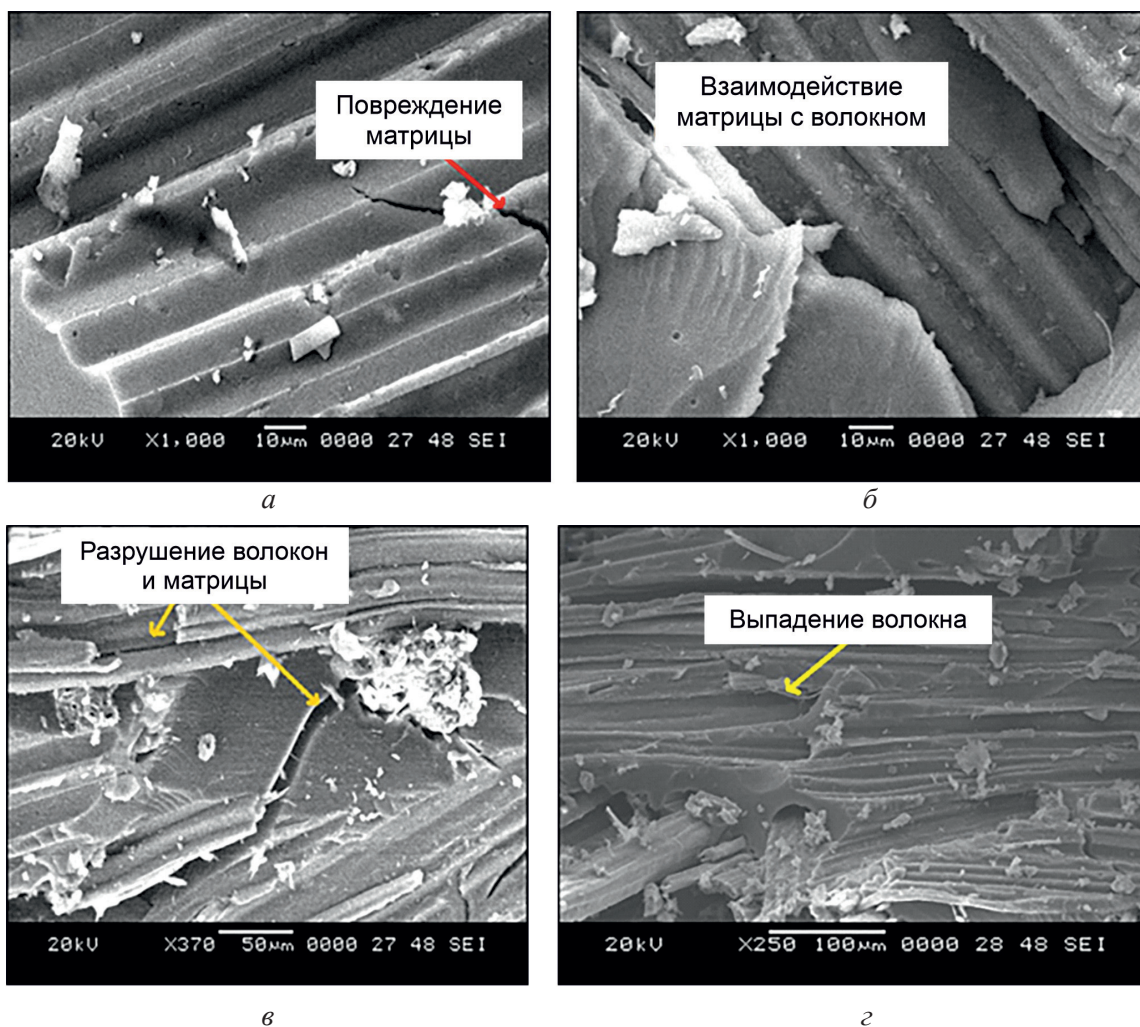
Строение поверхности

Для анализа взаимодействия волокнистой матрицы с полимерным композитом было проведено исследование изображений при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). СЭМ-изображения композитного материала представлены на рис. 7.

На рис. 7 показан характер взаимодействия волокон и матрицы композиционного материала. Так, на рис. 7, б видно разрушение матрицы в направлении, противоположном приложенной силе, что свидетельствует о ее хрупкости. При использовании джутовых волокон для упрочнения матрицы (рис. 7, а) разрушение происходит

под углом, что свидетельствует о повышении пластичности композита. На рис. 7, б, г также видно, что сначала разрушилась матрица, а затем волокна, — это указывает на то, что волокна в композите должны были выдерживать самые большие нагрузки. Матрица также служила связующим для джутовых волокон.

М. Раджеш и др. [1, 3–5] и Савендра Пратап Сингх [2] работали над композиционными материалами из плетеного джутового волокна и отметили их повышенные свойства. Однако они исследовали КМ на основе одного, двух и трех слоев плетеного джутового волокна в различных комбинациях. В настоящей исследовательской работе авторы рассмотрели композиционный



а

б

в

г

Рис. 7. СЭМ-изображения композитного материала:

а – повреждение матрицы; б – взаимодействие матрицы с волокном; в – разрушение волокон и матрицы; г – выпадение волокна

Fig. 7. SEM images of composite:

а – matrix damage; б – fibre matrix interaction; в – failure of fibres and matrix; г – fibre pulling out

материал на основе четырех слоев плетеного джутового волокна. Авторы выполнили предварительную обработку поверхности волокон и выявили ее положительное влияние на свойства. Это открывает перспективы для дальнейшего конструкционного использования такого композиционного материала и замены им КМ на основе синтетических волокон, что снизит уровень загрязнения окружающей среды синтетическими отходами.

Заклучение

Согласно исследованию, композит на основе натурального волокна обладает превосходными механическими свойствами и характеристиками свободных колебаний, что делает его пригодным

для использования в условиях низкого и среднего нагружения. Механические характеристики и характеристики свободных колебаний джутовых волокон значительно повышаются после обработки поверхности NaOH, но концентрация щелочи и время выдержки в ней волокон не оказывают существенного влияния на качество композита в целом. Гидрофильный характер композита выявлен в результате ИКФС-анализа, это препятствует его применению во влажной среде. СЭМ-анализ показывает, что по мере увеличения количества волокна композитный материал изменяется от хрупкого до пластичного. Заключение по исследованию свободных колебаний и механического поведения обработанного тканого джутового полимерного композита будет зависеть от конкретных выводов и результатов,



полученных в результате исследования. Однако можно сделать некоторые выводы.

1. Улучшение механических свойств. Обработка тканого джутового полимерного композита может привести к улучшению механических свойств по сравнению с необработанным композитом. Процесс обработки может включать такие методы, как химическая модификация, обработка поверхности или введение армирующего агента. Эти методы обработки могут улучшить прочность и жесткость композиционного материала, а также устойчивость к деформации.

2. Улучшение вибропоглощения. Анализ свободных колебаний помогает оценить динамическое поведение материалов и конструкций. Обработанные тканые джутовые полимерные композиты могут демонстрировать улучшенные характеристики поглощения вибрации по сравнению с необработанными композитами. Процесс обработки может изменить границу раздела волоконной матрицы, что приведет к улучшению рассеивания энергии при вибрациях и увеличению демпфирующей способности.

Список литературы

1. *Rajesh M., Singh S.P., Pitchaimani J.* Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics // *Journal of Industrial Textiles.* – 2018. – Vol. 47 (5). – P. 938–959. – DOI: 10.1177/1528083716679157.
2. *Singh S.P.* FTIR spectroscopy & mechanical behaviour study on jute fiber polymer composite // *Journal of Advanced Engineering Research.* – 2019. – Vol. 6 (1). – P. 34–38.
3. The hygroscopic effect on dynamic and thermal properties of woven jute, banana, and intra-ply hybrid natural fiber composites / *M. Rajesh, K. Jayakrishna, M.T.H. Sultan, M. Manikandan, V. Mugeshkannan, A.U.M. Shah, S.N.A. Safri* // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2020. – Vol. 9 (5). – P. 10305–10315. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.033.
4. *Rajesh M., Pitchaimani J.* Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression // *Composite Structures.* – 2016. – Vol. 163. – P. 302–311. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.046.
5. *Rajesh M., Pitchaimani J.* Mechanical properties of natural fiber braided yarn woven composite: comparison with conventional yarn woven composite // *Journal of Bionic Engineering.* – 2017. – Vol. 14. – P. 141–150. – DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60385-2.
6. Fatigue life and residual strength of a short-natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon / *M. Mejri, L. Toubal, J.C. Cuillière, V. François* // *Composites. Part B: Engineering.* – 2017. – Vol. 110. – P. 429–441. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.036.
7. *Tian F., Zhong Z.* Modeling of load responses for natural fiber reinforced composites under water absorption // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2019. – Vol. 125. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105564.
8. *Sarikaya E., Çallioğlu H., Demirel H.* Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties // *Composites. Part B: Engineering.* – 2019. – Vol. 167. – P. 461–466. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.020.
9. Effect of natural fiber reinforced polymers on confined compressive strength of concrete / *T. Jirawattanasomkul, T. Ueda, S. Likitlersuang, D. Zhang, N. Hanwiboonwat, N. Wuttiwannasak, K. Horsangchai* // *Construction and Building Materials.* – 2019. – Vol. 223. – P. 156–164. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.217.
10. Characterization of silane treated and untreated natural cellulosic fiber from corn stalk waste as potential reinforcement in polymer composites / *Y. Liu, X. Lv, J. Bao, J. Xie, X. Tang, J. Che, Y. Ma, J. Tong* // *Carbohydrate Polymers.* – 2019. – Vol. 218. – P. 179–187. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.04.088.
11. Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibers: Experimental and theoretical approaches / *E. Taban, A. Khavanin, A. Ohadi, A. Putra, A.J. Jafari, M. Faridan, A. Soleimanian* // *Building and Environment.* – 2019. – Vol. 161. – P. 106274. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106274.
12. *Devnani G.L., Sinha S.* Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Vol. 18, pt. 3. – P. 647–654. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.460.
13. Elemental analysis of brake pad using natural fibers / *S. Sri Karthikeyan, E. Balakrishnan, S. Meganathan, M. Balachander, A. Ponshanmugakumar* // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Vol. 16, pt.2. – P. 1067–1074. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.197.
14. *Singh S.P., Dutt A., Hirwani C.K.* Experimental and numerical analysis of different natural fiber polymer composite // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2023. – Vol. 38, iss. 3. – P. 322–332. – DOI: 10.1080/10426914.2022.2136379.
15. Mechanical behaviour of Natural and Glass fiber reinforced with polymer matrix composite / *M. Balachandar, B. Vijaya Ramnath, P. Jagadeeshwar, R. Yokesk* // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Vol. 16, pt. 2. – P. 1297–1303. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.227.
16. *Bakri M.K.B., Jayamani E.* Comparative study of functional groups in natural fibers: Fourier transform infrared analysis (Ftir) // *International Journal of Current*

Engineering and Scientific Research (IJCESR). – 2016. – Vol. 3 (1). – P. 154–161.

17. Jayamani E., Loong T.G., Bakri M.K.B. Comparative study of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of natural fibres treated with chemical, physical and biological methods // *Polymer Bulletin*. – 2020. – Vol. 77. – P. 1605–1629. – DOI: 10.1007/s00289-019-02824-w.

18. Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports-good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties / Y. Singh, J. Singh, S. Sharma, T.-D. Lam, D.-N. Nguyen // *Journal of Material Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9 (6). – P. 15593–15603. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.023.

19. Natural fiber-reinforced thermoplastic composites from woven-nonwoven textile preforms: Mechanical and fire performance study / B.K. Kandola, S.I. Mistik, W. Pornwannachai, S.C. Anand // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 153. – P. 456–464. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.013.

20. Sekaran A.S.J., Kumar K.P. Study on drilling of woven sisal and aloe vera natural fiber polymer composite // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 16, pt. 2. – P. 640–646. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.140.

21. Fabrication and mechanical property evaluation of non-woven banana fiber epoxy-based polymer composite / S.P. Gairola, Y.K. Tyagi, B. Gangil, A. Sharma // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44 (6). – P. 3990–3996. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.103.

22. Baghaei B., Skrifvars M., Berglin L. Characterization of thermoplastic natural fiber composites made from woven hybrid yarn prepreps with different

weave pattern // *Composites: Part A*. – 2015. – Vol. 76. – P. 154–161. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.05.029.

23. Venkatesha B.K., Saravanan R., Anand Babu K. Effect of moisture absorption on woven bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 45, pt. 1. – P. 216–221. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.421.

24. Arumugam C., Arumugam S., Muthusamy S. Mechanical, thermal and morphological properties of unsaturated polyester/chemically treated woven kenaf fiber/AgNPs@PVA hybrid nano bio composites for automotive applications // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9 (6). – P. 15298–15312. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.084.

25. Chemical and mechanical reprocessed resins and bio-composites based on five epoxidized vegetable oils thermosets reinforced with flax fibers or PLA woven / C. Di Mauro, A. Genua, M. Rymarczyk, C. Dobbels, S. Malburet, A. Graillot, A. Mija // *Composites Science and Technology*. – 2021. – Vol. 205. – P. 108678. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108678.

26. Experimental investigation on the mechanical properties of woven hybrid fiber reinforced epoxy composite / V. Santhanam, R. Dhanaraj, M. Chandrasekaran, N. Venkateshwaran, S. Baskar // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 37 (2). – P. 1850–1853. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.444.

27. Mechanical and dynamic mechanical thermal properties of ensete fiber/woven glass fiber fabric hybrid composites / T.A. Negawo, Y. Polat, Y. Akgul, A. Kilic, M. Jawaaid // *Composite Structures*. – 2021. – Vol. 259. – P. 113221. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113221.

28. Bhattacharjee A., Roy H. Assessment of tensile and damping behaviour of hybrid particle/woven fiber/polymer composites // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 244. – P. 112231. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112231.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Free vibration and mechanical behavior of treated woven jute polymer composite

Savendra Singh ^{a, *}, Chetan Hirwani ^b

Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Patna, Patna, Bihar, 800005, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5151-0284>,  savendrasingh123@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4291-4575>,  hirwani.ck22@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 June 2023

Revised: 30 June 2023

Accepted: 10 July 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Natural fiber

FTIR

Surface treatment

Natural frequency

Damping

Free vibration

SEM

Acknowledgements

Authors are very thankful to Rajkiya Engineering College, Azamgarh for providing laboratory for research work.

ABSTRACT

Introduction: Recently, the use of natural fibers have been increased to replace the use of synthetic fibers to save our environment from waste disposal problems, natural fibers have a lower level of mechanical properties. **The purpose of work:** This study examines the effect of treating the surface and deeper layers of jute fiber on the mechanical behavior and characteristics of free vibrations of a composite material based on it. **The methods of investigation:** due to the uniform distribution of stresses in the *WARP* and *WEFT* directions, four-layer basket weave jute fibers were used in this study. **Result and discussion:** the mechanical and free vibration properties of composite materials are significantly improved when *NaOH* is applied to jute fibers because it eliminates the weak matrix material lignin and makes the fibers stiffer and stronger. However, increasing the percentage of *NaOH* and soaking time for the fibers in *NaOH* solution have little effect on these properties. The highest value of tensile strength and tensile modulus are found 50 ± 1.17 MPa and 1.94 ± 0.23 GPa respectively seen in case of basket weave jute fiber composite with 1 hour treatment. Tensile strength and tensile modulus increase about 12 % and 40 % over the stokes value, respectively. Similarly the value of flexural strength and flexural modulus are found 95 ± 1.17 MPa and 3.99 ± 0.23 GPa respectively in case of basket weave jute fiber composite with 1 hour treatment. It also shows the highest value of fundamental frequency 77.837 Hz. The presence of an *O-H* bond in the composite, as revealed by *FTIR* study, gives it a hydrophilic character and limits its use in humid environments. The fiber to matrix ratio is shown in *SEM* images.

For citation: Singh S.P., Hirwani C.K. Free vibration and mechanical behavior of treated woven jute polymer composite. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 137–151. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-137-151. (In Russian).

References

1. Rajesh M., Singh S.P., Pitchaimani J. Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, vol. 47 (5), pp. 938–959. DOI: 10.1177/1528083716679157.
2. Singh S.P. FTIR spectroscopy & mechanical behaviour study on jute fiber polymer composite. *Journal of Advanced Engineering Research*, 2019, vol. 6 (1), pp. 34–38.
3. Rajesh M., Jayakrishna K., Sultan M.T.H., Manikandan M., Mugeshkannan V., Shah A.U.M., Safri S.N.A. The hydroscopic effect on dynamic and thermal properties of woven jute, banana, and intra-ply hybrid natural fiber composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9 (5), pp. 10305–10315. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.033.

* Corresponding author

Singh Savendra Pratap, Assistant professor
 Department of Mechanical Engineering
 National Institute of Technology Patna,
 800005, Patna, Bihar, India

Tel.: +91-9455446960, e-mail: savendrasingh123@gmail.com

4. Rajesh M., Pitchaimani J. Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression. *Composite Structures*, 2016, vol. 163, pp. 302–311. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.046.
5. Rajesh M., Pitchaimani J. Mechanical properties of natural fiber braided yarn woven composite: comparison with conventional yarn woven composite. *Journal of Bionic Engineering*, 2017, vol. 14, pp. 141–150. DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60385-2.
6. Mejri M., Toubal L., Cuillière J.C., François V. Fatigue life and residual strength of a short- natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon. *Composites. Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 429–441. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.036.
7. Tian F., Zhong Z. Modeling of load responses for natural fiber reinforced composites under water absorption. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 125. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105564.
8. Sarikaya E., Çallioğlu H., Demirel H. Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties. *Composites. Part B: Engineering*, 2019, vol. 167, pp. 461–466. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.020.
9. Jirawattanasomkul T., Ueda T., Likitlersuang S., Zhang D., Hanwiboonwat N., Wuttiwannasak N., Horsangchai K. Effect of natural fiber reinforced polymers on confined compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 223, pp. 156–164. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.217.
10. Liu Y., Lv X., Bao J., Xie J., Tang X., Che J., Ma Y., Tong J. Characterization of silane treated and untreated natural cellulosic fiber from corn stalk waste as potential reinforcement in polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 2019, vol. 218, pp. 179–187. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.04.088.
11. Taban E., Khavanin A., Ohadi A., Putra A., Jafari A.J., Faridan M., Soleimani A. Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibers: Experimental and theoretical approaches. *Building and Environment*, 2019, vol. 161, p. 106274. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106274.
12. Devnani G.L., Sinha S. Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 18, pt. 3, pp. 647–654. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.460.
13. Sri Karthikeyan S., Balakrishnan E., Meganathan V., Balachander M. Elemental analysis of brake pad using natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, pt. 2, pp. 1067–1074. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.197.
14. Singh S.P., Dutt A., Hirwani C.K. Experimental and numerical analysis of different natural fiber polymer composite. *Materials and Manufacturing Processes*, 2023, vol. 38, iss. 3, pp. 32–332. DOI: 10.1080/10426914.2022.2136379.
15. Balachandar M., Vijaya Ramnath B., Jagadeeshwar P., Yokesh R. Mechanical behaviour of Natural and Glass fiber reinforced with polymer matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, pt. 2, pp. 1297–1303. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.227.
16. Bakri M.K.B., Jayamani E. Comparative study of functional groups in natural fibers: Fourier transform infrared analysis (FTIR). *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*, 2016, vol. 3 (1), pp. 154–161.
17. Jayamani E., Loong T.G., Bakri M.K.B. Comparative study of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of natural fibres treated with chemical, physical and biological methods. *Polymer Bulletin*, 2020, vol. 77, pp. 1605–1629. DOI: 10.1007/s00289-019-02824-w.
18. Singh Y., Singh J., Sharma S., Lam T.-D., Nguyen D.-N. Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports-good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties. *Journal of Material Research and Technology*, 2020, vol. 9 (6), pp. 15593–15603. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.023.
19. Kandola B.K., Mistik S.I., Pornwannachai W., Anand S.C. Natural fiber-reinforced thermoplastic composites from woven-nonwoven textile preforms: Mechanical and fire performance study. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 153, pp. 456–464. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.013.
20. Sekaran A.S.J., Kumar K.P. Study on drilling of woven sisal and aloe vera natural fiber polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, pt. 2, pp. 640–646. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.140.
21. Gairola S.P., Tyagi Y.K., Gangil B., Sharma A. Fabrication and mechanical property evaluation of non-woven banana fiber epoxy-based polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44 (6), pp. 3990–3996. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.103.
22. Baghaei B., Skrifvars M., Berglin L. Characterization of thermoplastic natural fiber composites made from woven hybrid yarn prepregs with different weave pattern. *Composites: Part A*, 2015, vol. 76, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.05.029.

23. Venkatesha B.K., Saravanan R., Anand Babu K. Effect of moisture absorption on woven bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pt. 1, pp. 216–221. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.421.

24. Arumugam C., Arumugam S., Muthusamy S. Mechanical, thermal and morphological properties of unsaturated polyester/chemically treated woven kenaf fiber/AgNPs@PVA hybrid nano bio composites for automotive applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9 (6), pp. 15298–15312. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.084.

25. Di Mauro C., Genua A., Rymarczyk M., Dobbels C., Malburet S., Graillot A., Mija A. Chemical and mechanical reprocessed resins and bio-composites based on five epoxidized vegetable oils thermosets reinforced with flax fibers or PLA woven. *Composites Science and Technology*, 2021, vol. 205, p. 108678. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108678.

26. Santhanam V., Dhanaraj R., Chandrasekaran M., Venkateshwaran N., Baskar S. Experimental investigation on the mechanical properties of woven hybrid fiber reinforced epoxy composite. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37 (2), pp. 1850–1853. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.444.

27. Negawo T.A., Polat Y., Akgul Y., Kilic A., Jawaid M. Mechanical and dynamic mechanical thermal properties of ensete fiber/woven glass fiber fabric hybrid composites. *Composite Structures*, 2021, vol. 259, p. 113221. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113221.

28. Bhattacharjee A., Roy H. Assessment of tensile and damping behaviour of hybrid particle/woven fiber/polymer composites. *Composite Structures*, 2020, vol. 244, p. 112231. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112231.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Уважаемые *Авторы*, в связи с включением журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования *Web of Science* и *Scopus* изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (*Abstract*) и список использованной автором литературы (*References*), поскольку именно они, а не текст самой статьи, находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности *Abstract* и *References* должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно в интересах автора тщательно подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

В журнале публикуются результаты **оригинальных** фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. **Опубликованные ранее научные работы не принимаются к рассмотрению и изданию!** Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» зарегистрирован по следующим научным специальностям: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; Технология машиностроения; Сварка, родственные процессы и технологии; Машины, агрегаты и процессы (по отраслям); Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; Порошковая металлургия и композиционные материалы; Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям); Металловедение (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) 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 обнаружили такие ошибки, обязательно сделайте коррекцию своего профиля! После заполнения профиля необходимо обеспечить доступ к публичной информации.

Огромная просьба ко всем авторам – проверить и подкорректировать данные в своих профилях на платформах SCOPUS и WoS. Указать все свои цифровые идентификаторы (ЦИ) в профиле на сайте журнала. Внимание! При внесении соответствующего ЦИ, прежде чем сохранить введенные значения в профиле, необходимо посмотреть пример и кликнуть на рядом располагающуюся кнопку «Проверка профиля». Если введенные значения верны, то издательская система журнала откроет соответствующую страницу в интернете с вашими данными. Будьте внимательны, когда вводите РИНЦ AuthorID. Данный цифровой идентификатор нельзя путать с SPIN-кодом.

Внимание! РИНЦ AuthorID должен быть введен каждым автором в свой профиль на сайте журнала.

Научная статья должна иметь структуру **IMRAD (Introduction, Methods, Results And Discussion)**:

- название (*Title*);
- аннотация (*Abstract*);
- введение (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements / Funding*);
- список литературы (*References*).

АННОТАЦИЯ к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (сле-

довать логике описания результатов в статье) (см. примеры в разделе «Правила оформления»). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: *обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.*

В аннотации Вы должны выдержать структуру IMRAD и **четко указать в тексте (как для русской, так и для английской версии)** соответствующие разделы: **Introduction** (введение); **Methods** (методы); **Results And Discussion** (результаты и обсуждения) (см. пример).

Объем аннотации (реферата) на русском языке должен быть 200...250 слов. Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!

Пример структурированной аннотации

• На русском языке

Введение. Сварка оказывает большое влияние на работоспособность создаваемых конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, вследствие снижения сопротивляемости зарождению и распространению трещин в зоне термического влияния и металла шва. Несмотря на существующее достаточно большое количество способов повышения надежности сварных соединений, некоторые из них сейчас полностью исчерпали свои возможности, а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому разработка необходимой специальной технологии сварки в условиях низких температур остается актуальной проблемой. **Цель работы:** изыскание путей повышения надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения при сварке в условиях низких температур. **В работе исследованы** сварные соединения стали 09Г2С, полученные сваркой на постоянном токе и в режиме импульсной низкочастотной модуляции тока в условиях положительных (+20 °С) и отрицательных (-45 °С) температур окружающего воздуха с применением трех новых марок сварочных электродов. **Методами исследования** являются механические испытания на статистическое растяжение и на ударный изгиб образцов сварных соединений, а также спектральный анализ химического состава и металлографические исследования металла шва. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что эксплуатационные показатели металлоконструкций зависят от выбора способа и температуры выполнения сварки, а также характеристик сварочного материала. Установлено, что для повышения значений ударной вязкости образцов, сваренных в условиях отрицательных температур методом адаптивной импульсно-дуговой сварки, требуется увеличение тепловложения, относительно погонной энергии, реализуемой в процессе сварки образцов при положительной температуре. 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 про-

блема, которая рассматривается в вашей статье. В связи с этим в данном разделе следует представить достаточно информированный (с равномерно распределенными ссылками на источники) литературный обзор по состоянию обозначенной проблемы. В конце раздела «Введение» формулируются **цель работы и обозначаются задачи**, решение которых позволит достичь поставленной цели. Не нужно в данном разделе говорить о конкретном результате, поскольку в структуре статьи есть соответствующий раздел.

МЕТОДЫ (МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ) / *Methods*

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по Госстандарту.

При проведении испытаний приводится следующая информация. 1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда. 2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т. д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ / *Results And Discussion*

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. Данный раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, показать перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ) / Conclusion

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

Качество графического материала!

По требованиям журнала графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах. Разрешение рисунков не ниже **600 dpi**. Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисовочная подпись (на **русском и на английском языке!**). Шрифты на рисунках должны быть увеличены и приведены к единообразию. Уважаемые авторы, журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является полноцветным печатным изданием. В вашей работе присутствуют рисунки, которые (для повышения наглядности) рекомендуется сделать цветными.

Название таблиц (как и внутреннее содержание) должно быть как на русском, так и на английском языках! (см. «Правила оформления».)

Математические формулы: сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны **только в редакторе формул Microsoft Equation 3.0!**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / References

Список цитируемой литературы включает источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации. Количество литературных ссылок должно быть **не менее 20** с большей (**более 50 %**) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать **15–17 %**. Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в списке литературы и в *References* лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>) или (<https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bis>).

Если статья имеет DOI – обязательно указать его! Если книга имеет ISBN – обязательно указать его!

Обратите внимание на правила оформления русскоязычных источников в **англоязычном блоке статьи** (в *References*).

Финансирование

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Конфликт интересов

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «Авторы заявляют об отсутствии конфликта

интересов» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «The author declare no conflict of interest»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

Уважаемые Авторы, журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» успешно прошел процедуру перерегистрации в РОСКОНАДЗОРе 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** (**I**ntroduction, **M**ethods, **R**esults, **D**iscussion, **C**onclusion).

Paper submission

In order to submit a paper, the **author (all co-authors!)** should be [signed up for the journal website](#). The author (one of the co-authors) in his office selects the “Submit a paper” in the menu and enters all the necessary data. The author selects his/her co-authors from the list of registered users.

Important: The work should be received no later than 3 months before the official publication of the issue according to the schedule. In exceptional cases, in agreement with the editors of the journal, the deadline for submitting a paper to the next issue can be extended, but not more than two weeks.

Schedule of the journal publication during the year

<i>Issue</i>	<i>Publication (month, date)</i>
1	03/15
2	06/15
3	09/15
4	12/15

Before sending the manuscript to the editors, the authors are highly recommended to check their paper using the **Anti-plagiarism** system. The allowable percentage of text borrowing from other sources is 5–10 %.

The manuscript of the paper is prepared in accordance with the formatting rules in MS Word and is attached in *.doc, *.docx format.

The scanned license agreement with the signatures of the authors and the expert opinion (**color mode, resolution of at least 600 dpi**) should also be attached on the journal’s website in the “Submit Paper” section in *.pdf, *.jpg, *.jpeg formats.

At the end of all the work, be sure to click the “Send to the Editor” button.

Simultaneously with the article, the original expert opinion on the possibility of open publication of the article is sent to the postal address of the editorial office: 630073, Novosibirsk, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk State Technical University (NSTU), bldg. 5, com. 137VTs, the deputy editor-in-chief Vadim Y. Skeebea.

When a manuscript is accepted for publication, an [author's license agreement](#) is additionally sent to the postal address of the editorial office.

All manuscripts are reviewed. There is no fee for publishing manuscripts.

Paper submission guidelines:

See the section "Paper Submission guidelines" (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules). Please read carefully all the points presented in these sections.

When formatting your work, it is recommended to use the template presented on the journal's website: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Authors affiliation

A list of authors should contain Full names. Names and Surnames of the author(s) should be written out. The full name of the organization for each of the authors, indicating the street, house number, city, postal code and country also should be written. For each of the authors, it is MANDATORY to indicate its unique identification code ORCID (Open Researcher and Contributor ID), RSCI AuthorID and e-mail. If there is no ORCID, then it is necessary to follow the link <https://orcid.org/> and register in the system. After registration, you need to edit your personal data and the list of publications.

After registering ORCID, you need to EDIT YOUR PERSONAL DATA AND THE LIST OF PUBLICATIONS IN THIS PROFILE (**"an empty" ORCID profile is not allowed!**). When uploading papers, give preference to English-language sources. **It is also recommended: when registering a profile in ORCID, use the Latin alphabet, not Cyrillic!**; indicate the full name, not the abbreviation. Do not confuse First name and Last name. If such errors are found, be sure to correct your profile! After filling out the profile, it is necessary to provide access to public information.

A huge request to all authors is also to check and correct the data in their profiles on the SCOPUS and WoS platforms. Indicate all your digital identifiers (CI) in your profile on the journal's website. **Attention!** When entering the corresponding CI, before saving the entered values in the profile, you need to look at the example and click on the "Check Profile" button located next to it. If the entered values are correct, the publishing system of the journal will open the corresponding page on the Internet with your data. Be careful when entering the RSCI AuthorID. This digital identifier should not be confused with the SPIN code.

Attention – the RSCI AuthorID should be entered by each author in his/her profile on the journal's website!

The scientific paper should have the structure of IMRAD (Introduction, Methods, Results and Discussion):

- Title;
- Abstract;
- Introduction;
- Methods;
- Results;
- Discussion;
- Conclusion;
- Acknowledgements / Funding;
- References.

Abstract

Paper **abstract** should be: informative (do not contain general words); original; meaningful (reflect the main content of the paper and the research results); structured (follow the results description logic) (see examples in the section "Paper Submission guidelines"). The abstract should include the following aspects of the content of the paper: *the rationale; the subject; the purpose of the work; method or methodology of the work; results of work; the field of application of the results; conclusions.*

In the abstract, you should adhere to the structure of IMRAD and **clearly indicate in the text (for both Russian and English versions)** the corresponding sections: **Introduction; Methods; Results and Discussion** (*see an example*).

The volume of the abstract in English should be at least 250 words!

An example of a structured abstract:

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide practical application. Therefore, the development of the necessary special welding technology in low temperature conditions remains an urgent problem. **The purpose of the work:** to find the ways to improve the reliability of high-duty metal constructions welded at low temperatures. The welded joints of 09G2S steel obtained by welding with direct current and pulsed low-frequency current modulation under conditions of positive (+ 20 °C) and negative (-45 °C) ambient air temperatures **are investigated** using three new types of welding electrodes. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and impact bending of welded samples, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallurgical studies of weld metal are undertaken. **Results and Discussion.** It is revealed that the metal constructions operational factors depend on the choice of the welding method and welding temperature, as well as the characteristics of the welding material. It is established that to increase the impact strength of samples welded at negative temperatures by the adaptive pulse-arc welding method, an increase in heat input is required, relative to the 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-bis>).

If the paper has a DOI, be sure to indicate it! If the book has an ISBN, be sure to include it!

Pay attention to the guidelines for formatting Russian-language sources in the **English-language section of the paper (in References)**.

Dear Authors, the journal “Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science” has successfully passed the re-registration procedure with ROSCOMNADZOR and, starting from 2021, is switching to the publication of a scientific publication in two languages. The first – printed (basic) – in Russian with an English part; the second – Electronic Publications (pdf) – all the work is completely in English. **After receiving a message about the acceptance of the paper for publication in the journal “Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science”, the authors should provide a high-quality translation of their paper into English** (machine translation is not allowed!). English version of the work should be formatted according to the template. **Attention!** The English version of the paper should be sent to the journal’s mail (metal_working@mail.ru) within 2 weeks!

*Editorial board and editorial council of the journal
“Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science”*

МАТЕРИАЛЫ СОУЧРЕДИТЕЛЕЙ

Внимание, инженеры и технические специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией, наладкой электроавтоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков, а также студенты и аспиранты профильных специальностей вузов, соучредитель журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)» ООО Научно-производственная коммерческая фирма «МАШСЕРВИСПРИБОР» готова предоставить свои страницы под рубрику «Системы автоматизации металлорежущих и металлообрабатывающих станков».

В представляемых для данной рубрики статьях должны быть изложены проблемы и их решения в рамках следующих тем:

- системы ЧПУ;
- станочные электроприводы;
- датчики и элементы станочной электроавтоматики;
- модернизация систем автоматизации и электроприводов;
- импортозамещение;
- автоматизация разработки технологических программ для станков с ЧПУ.

Преимуществом публикации будут пользоваться статьи, где отражены разработка и производство отечественных систем и элементов электроавтоматики, а также темы, посвященные импортозамещению. Для авторов статей под указанной выше рубрикой публикация является бесплатной.

Важно! Работа должна поступить не позднее чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях по согласованию с редакцией журнала срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели. Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы Антиплагиат. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %. Объем материалов рубрики в одном выпуске журнала не должен превышать трех печатных страниц журнала (15 000 знаков без пробелов).

Материалы для публикации принимаются ООО Научно-производственной коммерческой фирмой «МАШСЕРВИСПРИБОР» (e-mail: msp@chpu.ru). Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Вниманию авторов! Материалы, поступившие от лица ООО Научно-производственной коммерческой фирмы «МАШСЕРВИСПРИБОР», не индексируются в Национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ – метаданные статей не подаются в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU. Кроме того, метаданные указанных материалов соучредителя не отправляются в международные базы Web of Science и Scopus.

Для опубликования материалов в основных рубриках журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)», индексируемых в РИНЦ, Web of Science и Scopus, необходимо следовать правилам оформления и правилам подачи статей, представленных на сайте научного издания https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov.

Напоминаем, что в журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «ОМ» зарегистрирован по следующим научным специальностям: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; Технология машиностроения; Сварка, родственные процессы и технологии; Машины, агрегаты и процессы (по отраслям); Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; Порошковая металлургия и композиционные материалы; Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям); Материаловедение (по отраслям). Издание имеет право опубликовать научные работы только в рамках указанных специальностей!

В связи с тем, что журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» принимает оригинальные научные статьи в формате *Full Article*, стандартный формат для завершенных научных исследований, объем основного текста работы должен составлять не менее 18–20 страниц машинописного текста через 1,5 интервала) (учитывается тело статьи, без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 стр. Научная статья должна иметь структуру **IMRAD** (*Introduction, Methods, Results And Discussion*): • Введение (*Introduction*); • Методы / Методика исследований (*Methods*); • Результаты (*Results*); • Обсуждение (*Discussion*); • Заключение (*Conclusion*).

Порядок подачи статьи в редакцию представлен на странице: https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/how_to.

Для того чтобы подать статью, **автор (все соавторы)** должен быть зарегистрирован на сайте журнала. Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе *MS Word* и прикрепляется в формате *.doc, *.docx. При оформлении своей работы рекомендуется воспользоваться шаблоном, представленным на сайте журнала: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Сканированные лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (цветной режим сканирования, разрешение не менее 600 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg.

По окончании всех работ обязательно нажать кнопку «Отправить в редакцию».

Одновременно со статьей высылается оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается **авторский лицензионный договор**.

Все рукописи рецензируются. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Соучредители журнала
«ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология • оборудование • инструменты)»

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



WEB OF SCIENCE



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



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



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

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-80400 от 01 марта 2021 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 25 Number 3

JULY – SEPTEMBER 2023

OB RABOTKA METALLOV

**METAL WORKING
& MATERIAL SCIENCE**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

NOVOSIBIRSK