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

Том 24, Номер 2 АПРЕЛЬ – ИЮНЬ 2022

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

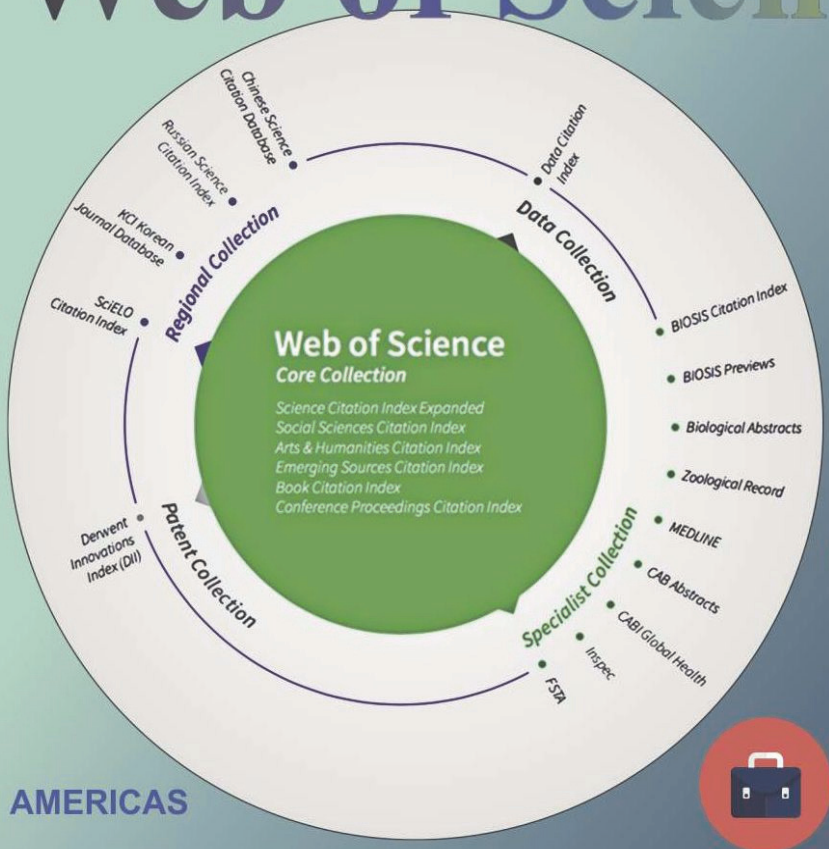
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science

Clarivate Analytics



Academic Search™ Ultimate

Applied Science & Technology Source™ Ultimate

Business Source ® Ultimate

Humanities Source™ Ultimate

Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

Расширенная версия ULTIMATE для успеха в научной работе

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

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Том 24 № 2 2022 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

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

В 2017 году журнал «*Обработка металлов* (*технология • оборудование • инструменты*)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index* (*ESCI*) базы *Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.

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

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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцивский Владимир Владимирович – доцент, доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

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

Адрес редакции и издателя:

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

Тел. +7 (383) 346-17-75

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

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

Цена свободная

16+

СОДЕРЖАНИЕ

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

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

Подписано в печать 06.06.2022. Выход в свет 15.06.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 15,0. Уч.-изд. л. 27,9. Изд. № 78. Заказ 189. Тираж 300 экз.

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

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

OBRABOTKA METALLOV
METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

Volume 24 No.2 2022 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

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

Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”) has been Indexed in Clarivate Analytics Services.
We sincerely happy to announce that Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”), ISSN 1994-6309 / E-ISSN 2541-819X is selected for coverage in Clarivate Analytics (formerly Thomson Reuters) products and services started from July 10, 2017. Beginning with No. 1 (74) 2017, this publication will be indexed and abstracted in: Emerging Sources Citation Index.

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

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

EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Spain:

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

Sergey V. Kirsanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
National Research Tomsk Polytechnic University, *Tomsk*;

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

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

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

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

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

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

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

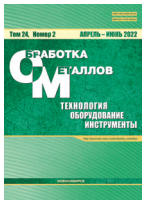
CONTENTS

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2022 Том 24 № 2 с. 6–24
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей

Сергей Тимофеев [1, a], *Анна Гринек* [2, b, *], *Андрей Хуртасенко* [3, c], *Игорь Бойчук* [2, d]

[1] Общество с ограниченной ответственностью «Промагро», Ржевское шоссе 370а, г. Шебекино, Белгородская область, 309290, Россия
[2] Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353918, Россия
[3] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, г. Белгород, 308012, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-6740-5163, timofeevsp@inbox.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-7953-3501, grinyokann@gmail.com,
[c] https://orcid.org/0000-0002-2614-5457, hurtintbel@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-1996-2184, boychuk@ieee.org

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.01

История статьи:
Поступила: 16 февраля 2022
Рецензирование: 14 марта 2022
Принята к печати: 23 марта 2022
Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:
Цифровое моделирование
Крупногабаритные детали
Бандаж
Измерение формы
Механическая обработка

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка способа контроля параметров точности крупногабаритных тел вращения представляет собой актуальную задачу, которая решается специалистами из различных отраслей. Возникновение погрешностей формы связано не только с большими габаритами и массами, но и условиями базирования самих агрегатов, при которых положение оси вращения непостоянно. Показано применение методики для коррекции механической обработки на основе измерения параметров формы поверхности непосредственно в процессе обработки. **Цель работы:** совершенствование мобильных технологий обработки с использованием специальных измерительных устройств и обрабатывающих модулей. Для этого решены задачи разработки и анализа математических моделей, описывающих процесс базирования и механической обработки бандажа как цилиндрического объекта с нестационарной осью вращения. Предлагаемая методика исследована, разработаны схемы контроля и реализовано оборудование для мобильной механической обработки. **Методами исследования** являются анализ разработанных математических моделей с позиции назначения эффективных технологических режимов, имитационное моделирование обработки, программно-аппаратная реализация предложенных решений, статистическая обработка результатов измерений. **Результаты и обсуждение.** Алгоритм и методика протестированы с помощью имитационной трехмерной модели. Представленная методика измерений и расчета припуска для восстановительной обработки позволяет сократить время обработки по сравнению с технологией с активным контролем формы и по сравнению с традиционной методикой назначения припуска для обработки. Измерение и корректировка припуска на основе данных измерения производятся не после каждого измерения, а только в случае перехода к чистовым переходам или для контроля процесса выполнения. Определено, что при обеспечении единой технологической базы на каждый отдельный технологический переход в рамках мобильной технологии механической обработки поверхности катания бандажей технологических барабанов повышается точность и скорость обработки. Разработана оригинальная конструкция устройства для контроля параметров, изготовлена экспериментальная установка и лабораторная модель бандажа.

Для цитирования: Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей / С.П. Тимофеев, А.В. Гринек, А.В. Хуртасенко, И.П. Бойчук // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 6–24. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24.

Введение

В ряде отраслей промышленности применяются крупногабаритные трубчатые, барабанные вращающиеся агрегаты длиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров [1, 2]. Их характерной особенностью является единый принцип работы, заключающийся в безостановочном перемещении больших масс материала с параллельной его обработкой: нагревом, измельчением, промывкой [3, 4]. Разработка способа контроля параметров точности крупногабаритных тел вращения представляет собой актуальную задачу, которая решается специалистами различных отраслей [5]. Возникновение погрешностей формы связано не только с большими габаритами и массами, но и условиями базирова-

***Адрес для переписки**
Гринек Анна Владимировна, к.т.н., доцент
Государственный морской университет
им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,
пр. Ленина, 93,
353918, г. Новороссийск, Россия
Тел.: +7-960-637-38-82, **e-mail:**grinyokann@gmail.com

ния самих агрегатов, при которых положение оси вращения непостоянно. Данный фактор также обусловливает специфику выполнения работ по обеспечению точности формы данных поверхностей путем механической обработки во время технологического вращения агрегата [6, 7]. Актуальной задачей является разработка технологии обеспечения точности формы поверхности катания бандажей, для которой возможен расчет режимов и прогнозирование результата обработки. Важным является применение для данной технологии активных методов управления процессом обработки на основе измерения параметров точности поверхности непосредственно в процессе обработки. При этом наиболее актуальными являются вопросы моделирования и расчета режимов процесса обработки на основе данных, полученных после измерения [8]. Внедрение технологии механической обработки роликов и бандажей цементных печей и элементов любых крупногабаритных конструкций требует разработки и изготовления специальных средств оснащения, а именно измерительного устройства и обрабатывающего модуля [9].

Максимально полная информация о сложной технической системе, полученная на основании математического моделирования и измерения, является базой для проектирования автоматизированных и регулируемых технологических процессов [10–12].

Решения в области измерения цилиндрических деталей и вычисления погрешности формы [13–16] в условиях неопределенности базирования, сложных эксплуатационных условиях основаны на статистических и детерминированных математических моделях, описывающих цилиндрические тела в статике и динамике. Существуют математические модели, описывающие поведение элементов цементной печи (бандажа, опорных роликов) и подобных агрегатов и механизмов на основании различных подходов и допущений [17–19].

Существуют бесконтактные системы измерения [20–22], позволяющие повысить точность измерений в условиях вибраций и запыленности цементного производства, использующие лазерные методы исследования.

Кроме того, есть потребность в разработке соответствующего программного обеспечения для данных устройств. Очевидно, что для этого требуются значительные временные и финансовые затраты. Поэтому для первоначального анализа эффективности и применимости предложенной технологии должна быть произведена её апробация с использованием виртуального моделирования или цифрового двойника процесса механической обработки бандажа.

Цель данной работы – совершенствование мобильных технологий обработки с использованием специальных измерительных устройств и обрабатывающих модулей. Это позволит существенно увеличить межремонтный цикл эксплуатации и сократить затрачиваемое время на проведение механической обработки крупногабаритных деталей – тел вращения.

Задачи исследования – разработка и анализ математических моделей, описывающих процесс базирования и механической обработки бандажа как цилиндрического объекта с нестационарной осью вращения, исследование предлагаемой методики, разработка схем контроля и реализация оборудования для мобильной механической обработки.

Методика исследований

В ходе выполнения работы реализован полный цикл действий с использованием оригинального способа контроля: от определения параметров точности формы до моделирования процесса обработки по рассчитанному маршруту.

Бандаж – крупногабаритное цилиндрическое тело с нестационарной осью вращения. В процессе технической эксплуатации он базируется на опорных роликах, при этом у агрегата отсутствует ось вращения. Как правило, ролики устанавливаются под углом 60° относительно оси печи. В зависимости от протяженности и массы такого технологического барабана количество опор может варьироваться от 2 до 8–10 штук.

Во время ремонтной механической обработки или контроля формы (без демонтажа агрегата) схема базирования не изменяется, при этом обрабатывающий модуль с инструментом устанавливается на обрабатываемой поверхности, и реализуется бесцентровая схема обработки. Проведение механической обработки опорных элементов вращающихся цементных печей по одной из существующих технологий назначает-

ся после выявления превышающей нормативные величины погрешности формы данных деталей.

Для виртуальной модели были взяты параметры формы поверхности катания бандажей эксплуатируемых печных агрегатов. Это позволило провести сравнительный анализ используемых технологий механической обработки. Непосредственно принятая для модели поверхность катания (рис. 1) имеет номинальный диаметр 6,1 м, ширину 1 м с величиной полного радиального биения около 12 мм и бочкообразным профилем продольного сечения. Построение виртуальной модели бандажа и устройств было выполнено в системе автоматизированного проектирования Siemens NX.

Расчет технологического припуска механической обработки требует данных о параметрах точности формы всей обрабатываемой поверхности. Представленная ниже методика измерения с трехмерной цифровой реконструкцией и реализованное измерительное устройство обеспечивают точность формы бандажей технологических барабанов непосредственно в процессе технологического вращения агрегатов.

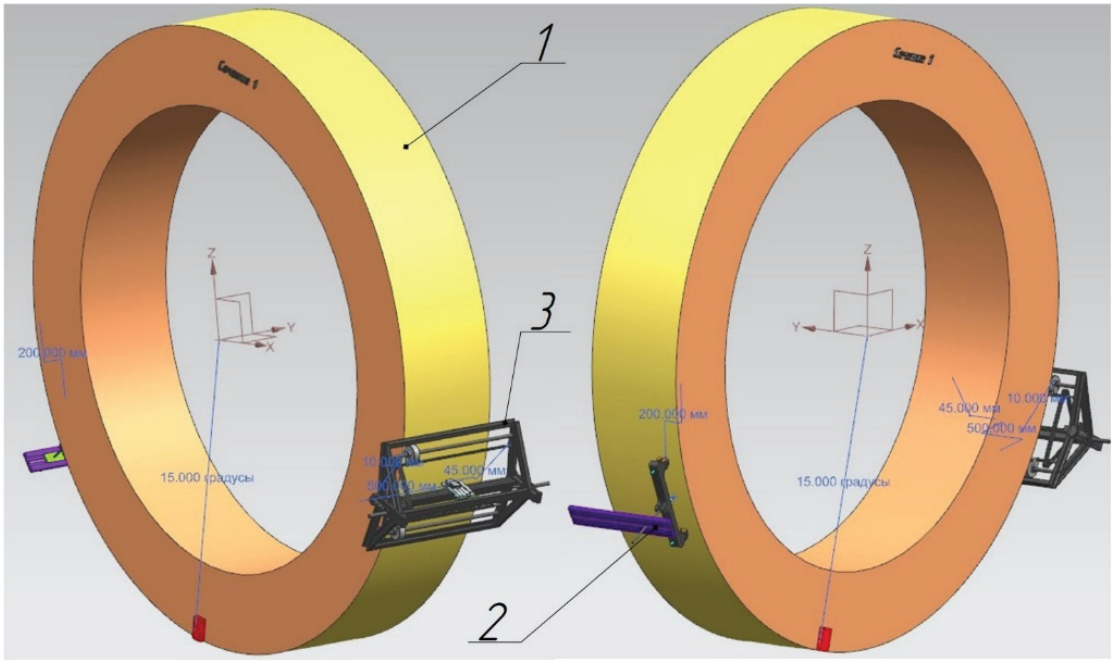


Рис. 1. Виртуальная модель бандажа и установленные для проведения обработки виртуальные модели измерительного устройства и обрабатывающего модуля:

1 – модель бандажа; *2* – измерительное устройство; *3* – обрабатывающий модуль

Fig. 1. Virtual model of the riding ring and the virtual models of the measuring device and the processing module installed for processing:

1 – model of the riding ring; *2* – measuring device; *3* – processing module

При разработке маршрута механической обработки исследовалась возможность исправления точности формы поверхности до нормативных величин согласно отраслевым стандартам – величина отклонения реального профиля всей поверхности от вписанного в нее цилиндра $\Delta_{TFZ}^{норм} = 3,05$ мм, с использованием ленточно-абразивного способа и минимизацией припуска на обработку (удаления припуска до размеров вписанного цилиндра).

Математические модели для технологии механической обработки и моделирование механической обработки

Расчет траектории движения независимого опорного устройства копирования (*далее НОУК*)

Алгоритм расчета положения НОУК при перемещении его по контуру базового сечения выглядит следующим образом (рис. 2):

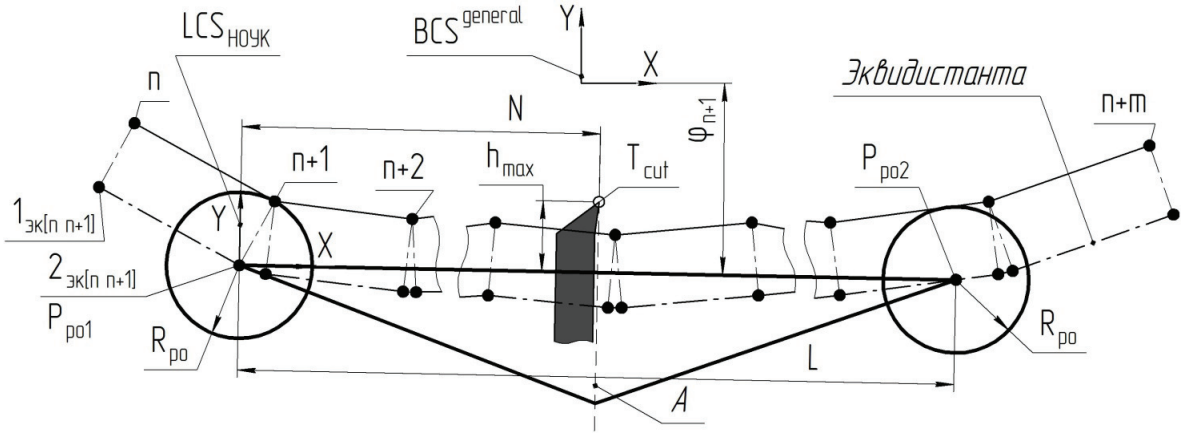


Рис. 2. Принципиальная схема расчета положения обрабатывающего модуля (*A* – линия, соответствующая оси перемещения кромки режущего инструмента)

Fig. 2. Schematic diagram of the calculation of the processing module position (*A* – line corresponding to the axis of movement of the cutting tool edge)

– ось первого опорного ролика НОУК (точка P_{po1}) совмещается с $n_{эк}$-й точкой полученной ранее эквидистанты;

– рассчитывается положение второго опорного ролика НОУК (точка P_{po2}) на эквидистанте;

– рассчитывается угол поворота локальной системы координат НОУК $LCS_{НОУК}$ относительно $BCS^{general}$;

– определяется уравнение прямой, проходящей через точку вершины режущего инструмента параллельно плоскости его перемещения;

– алгоритм повторяется для всех точек эквидистанты.

Для нахождения угла поворота локальной системы координат НОУК ($LCS_{НОУК}$, рис. 2) в $BCS^{general}$ необходимо определить положение точки P_{po2} для каждого положения.

Формулы расчета угла поворота $LCS_{НОУК}$ относительно $BCS^{general}$ для *m*-го положения НОУК с известными координатами точек P_{po1} и P_{po2}:

$$\varphi_m = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{Ppo2\_m} - y_{Ppo1\_m}}{x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m}}\right) \quad (1)$$

$$\text{при } x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m} > 0;$$

$$\varphi_m = 0 \text{ при } x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m} > 0 \text{ и } y_{Ppo2\_m} - y_{Ppo1\_m} = 0; \quad (2)$$

$$\varphi_m = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{Ppo2\_m} - y_{Ppo1\_m}}{x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m}}\right) + \pi \quad (3)$$

$$\text{при } x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m} < 0;$$

$$\varphi_m = \pi \text{ при } x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m} < 0 \text{ и } y_{Ppo2\_m} - y_{Ppo1\_m} = 0; \quad (4)$$

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} \text{ при } x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m} = 0 \text{ и } y_{Ppo2\_m} - y_{Ppo1\_m} > 0; \quad (5)$$

$$\varphi_m = -\frac{\pi}{2} \text{ при } x_{Ppo2\_m} - x_{Ppo1\_m} = 0 \text{ и } y_{Ppo2\_m} - y_{Ppo1\_m} < 0, \quad (6)$$

где x_{Ppo1_m} и y_{Ppo1_m} – координаты точки P_{po1} в $BCS^{general}$ для *m*-го положения НОУК; x_{Ppo2_m} и y_{Ppo2_m} – координаты точки P_{po2} в $BCS^{general}$ для *m*-го положения НОУК.

При известных координатах точки оси опорного ролика P_{po1}, конструктивных параметрах НОУК и угле φ_m, соответствующего повороту $LCS_{НОУК}$ относительно $BCS^{general}$, геометрические координаты крайней точки режущей части инструмента P_{cut} (далее точка резания) в $BCS^{general}$ находятся по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{Pcut\_m} \\ y_{Pcut\_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{Ppo1\_m} \\ y_{Ppo1\_m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi_m) & -\sin(\varphi_m) \\ \sin(\varphi_m) & \cos(\varphi_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ h_{max} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где x_{Pcut_m} и y_{Pcut_m} – координаты точки P_{cut} в $BCS^{general}$ для *m*-го положения НОУК.

Тогда расчет уравнения прямой, проходящей через известную точку P_{cut} по оси перемещения режущего инструмента в текущем положении НОУК (линия *A*, рис. 2), осуществляется по формуле

$$y = k(x - x_{Pcut\_m}) + y_{Pcut\_m}, \quad (8)$$

где k – коэффициент угла наклона прямой, определяемый по формуле

$$k = \mathrm{tg}\left(\varphi_m + \frac{\pi}{2}\right). \quad (9)$$

Для случая, когда $\varphi_m + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$, уравнение прямой соответствует формуле

$$x = x_{Pcut\_m}. \quad (10)$$

Расчет траектории движения НОУК

Исправление точности форм поверхности с одновременным обеспечением условий снятия максимального припуска и отсутствия зарезания поверхности до вписанного кругового цилиндра на каждом переходе осуществляется за счет расчета предельной величины вылета режущего инструмента на переход $h_{\text{р}\_\max}^{I}$ (где I – порядковый номер перехода). Определение величины $h_{\text{р}\_\max}^{I}$ производится на основе расчета траектории перемещения НОУК по контуру базового сечения поверхности и данных о параметрах вписанного цилиндра (рис. 3).

Алгоритм расчета $h_{\text{р}\_\max}^{I}$ представляет собой следующую последовательность.

1. Вычисляется точка пересечения прямой, соответствующей оси перемещения режущего

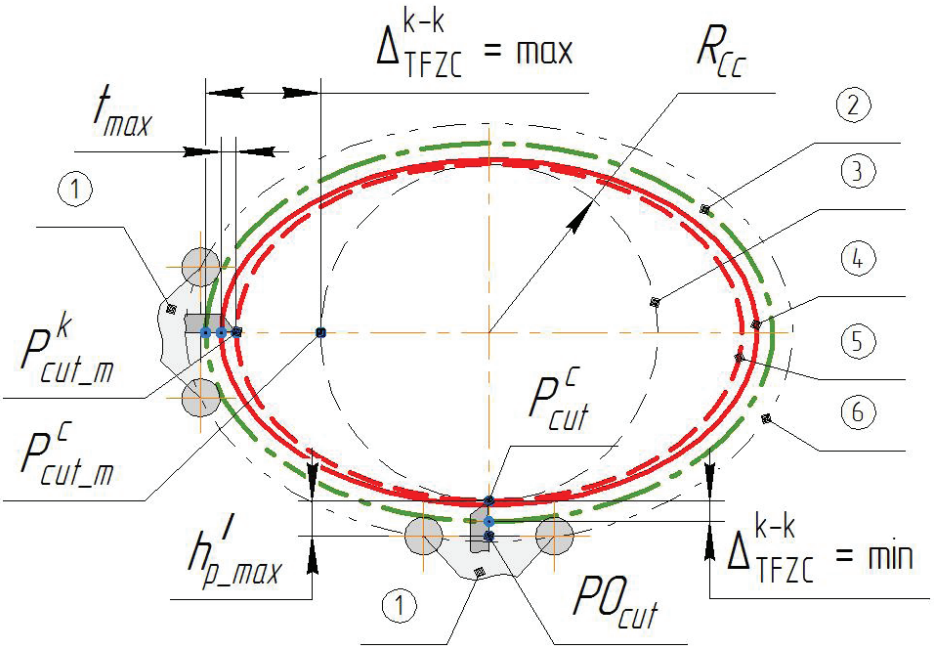


Рис. 3. Принципиальная схема к расчету $h_{\text{р}\_\max}^{I}$ на переход:

1 – обрабатывающий модуль; *2* – контур базового сечения; *3* – контур вписанного кругового цилиндра; *4* – контур поверхности до механической обработки на текущем переходе; *5* – контур поверхности после механической обработки для текущего перехода; *6* – эквидистанта к контуру базового сечения; *k-k* – участок поверхности, соответствующий технологической базе

*Fig. 3.*Schematic diagram for the calculation $h_{\text{р}\_\max}^{I}$ of the transition:

1 – processing module; *2* – contour of the base section; *3* – contour of the inscribed circular cylinder; *4* – contour of the surface before machining at the transition; *5* – contour surface after machining for a wide transition; *6* – equidistant to the contour of the technological section; *k-k* – surface area suitable for this base

инструмента в текущем положении НОУК (уравнение (8)), с контуром сечения вписанного кругового цилиндра $P^{C}_{cut\_m}$.

2. Вычисляется расстояние от точки $P^{C}_{cut\_m}$ до нулевой точки $P0_{cut\_m}$ НОУК $\left(\text{точка, в которой принят вылет режущего инструмента } h^{I}_{\text{p}} = 0\right)$. Расчет производится по формуле

$$h^{I}_{\text{p}\_m} = \sqrt{(x_{Pcut\_m} - x_{P0\_m})^2 + (y_{Pcut\_m} - y_{P0\_m})^2}, \quad (11)$$

где x_{Pcut_m} и y_{Pcut_m} – координаты точки $P0_{cut\_m}$ в BCS^{general} для m-го положения НОУК, определяемые по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{P0cut\_m} \\ y_{P0cut\_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{P\text{po}1\_m} \\ y_{P\text{po}1\_m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi_m) & -\sin(\varphi_m) \\ \sin(\varphi_m) & \cos(\varphi_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

3. Из полученных расстояний выбирается минимальное по величине значение и назначается как $h^{I}_{\text{p}\_\max}$.

4. Производится расчет точек P^{k}_{cut} для всех положений НОУК при величине вылета режущего инструмента, равной $h^{I}_{\text{p}\_\max}$. По полученным точкам P^{k}_{cut} строится B-сплайн, определяющий максимально достижимую форму контура сечения поверхности после механической обработки на данном переходе (линия *5*, рис. 4). Расчетная величина $h^{I}_{\text{p}\_\max}$ определяет максимальный снимаемый припуск на I-м переходе, обеспечивающий механическую обработку поверхности до размеров вписанного кругового цилиндра (без зарезаний).

Расчет максимальной глубины врезания

Из принятой схемы обработки и стратегии назначения рабочих ходов следует, что фактическая глубина резания является величиной переменной и зависит от траектории перемещения НОУК по базовому участку поверхности, а также от искажения формы поверхности в обрабатываемом сечении. В связи с этим возможно превышение предельно допустимой глубины резания $t^{per}_{\max}$ (*per. – permisible*), при котором произойдет выход из строя режущего инструмента и/или обрабатывающего модуля. Для предотвращения указанного случая необходим расчет максимально достигаемой глубины резания $t^{k}_{\max}$ (рис. 4) в каждом k-м поперечном сечении зоны обработки для текущих параметров предельной величины вылета режущего инструмента $h^{I}_{\text{p}\_\max}$ на технологический переход.

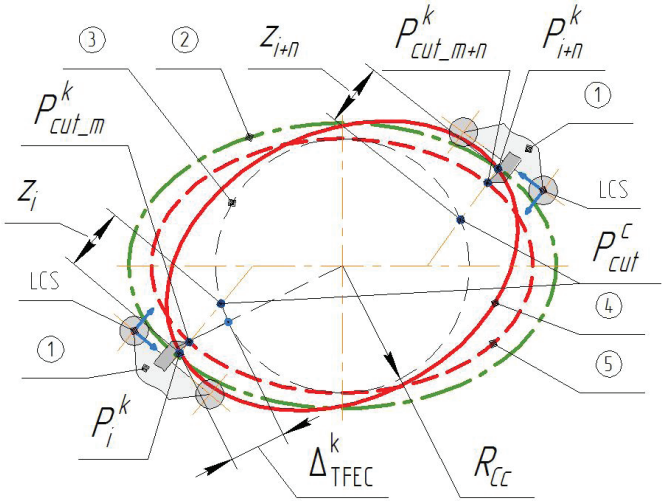


Рис. 4. Принципиальная схема расчета глубины резания в k-м сечении:

1 – обрабатывающий модуль; *2* – контур базового сечения; *3* – контур вписанного кругового цилиндра; *4* – контур поверхности до механической обработки на текущем переходе; *5* – расчетный контур поверхности после механической обработки для текущего перехода; z_i – расчетный максимальный припуск на механическую обработку для текущего перехода и положения НОУК

Fig. 4. Schematic diagram of calculating the depth of cut in the k-th section:

1 – processing module; *2* – base section contour; *3* – inscribed circular cylinder contour; *4* – surface contour before machining at the current transition; *5* – calculated surface contour after machining for the current transition; z_i – is the calculated maximum machining allowance for the current transition and the position of the NOUK

Расчет величины $t^{k}_{\max}$ в k-м сечении на основе приведенной ранее модели процесса формообразования (пункт) производится по нижеприведенному алгоритму.

Вычисление точек врезания инструмента для каждого из положений НОУК

Вычисляются координаты точки P_i^k (рис. 4), соответствующей пересечению прямой, вдоль которой осуществляется перемещение режущего инструмента (уравнение (8)), с контуром поперечного сечения поверхности *4* (рис. 4), до обработки для каждого из известных положений НОУК, полученных при расчете $h_{\text{p}\_\max}^I$.

Каждой точке $P_{cut\_m}^k$ должна соответствовать только одна точка P_i^k, однако в общем случае решение имеет две точки пересечения прямой (уравнение (8)) и контура обрабатываемого сечения поверхности *4* (рис. 4). Поэтому для дальнейших расчетов принимается точка, для которой модуль расстояния от точки P_{cut}^k наименьший.

Результаты и их обсуждение

Определение параметров точности формы виртуальной модели бандажа

Для определения параметров точности формы поверхности катания виртуальной модели бандажа была произведена ее виртуальная реконструкция на основе измерения *6* поперечных сечений. Каждое сечение отстоит от соседнего на расстоянии 200 мм, при этом крайние сечения совпадают с ребрами модели.

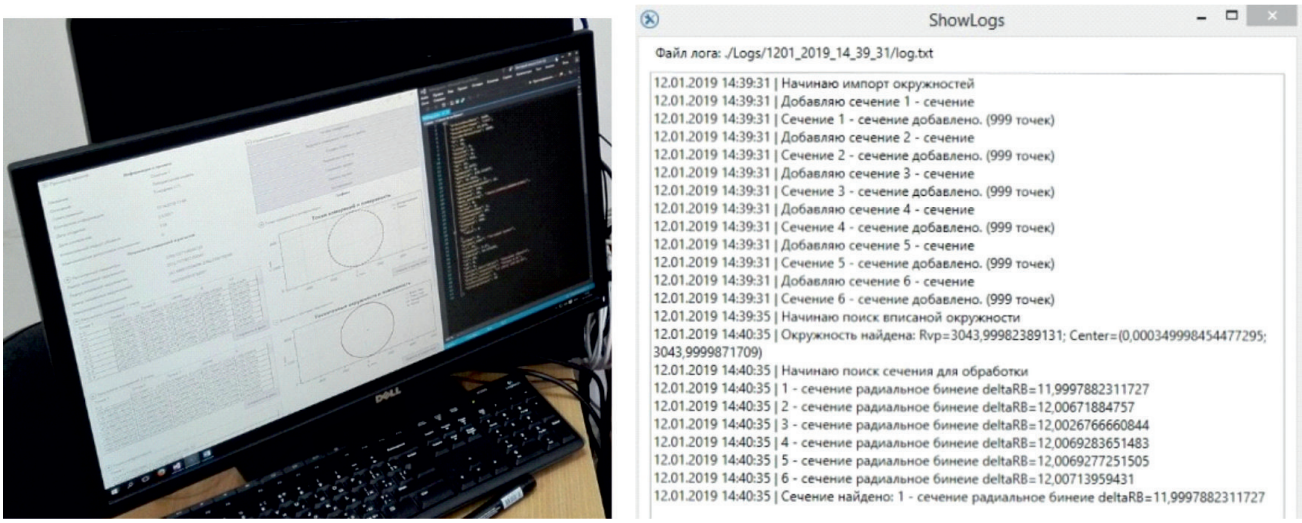
Для экспериментальных измерений и проверки работоспособности решений использовалась параметризованная виртуальная модель измерительного устройства (см. рис. 1), соответствующая оригинальной принципиальной запатентованной схеме измерительного устройства, а также программный модуль (рис. 5), реализующий алгоритм расчета параметров точности формы поперечного сечения.

На рис. 6 представлены расчетные распределения величины Δ_{TFEC}^k для сечений с максимальной и минимальной величиной погрешности формы.

Совмещенная диаграмма контуров сечений и вписанного цилиндра показана на рис. 7. Полученные расчетные данные по параметрам точности формы поверхности катания используются для дальнейшего анализа и разработки маршрута механической обработки.

Построение маршрута механической обработки

Согласно предложенной технологии первоначально произведен анализ обрабатываемой поверхности по полученным на этапе измерения



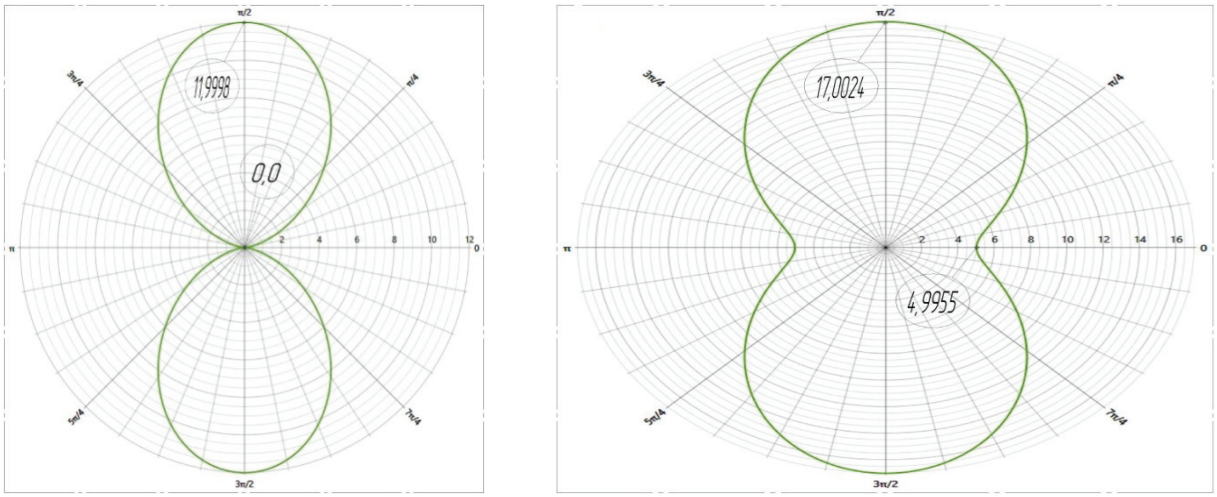
а *б*

Рис. 5. Программная реализация алгоритма расчета формы:

а – пользовательский интерфейс программы; *б* – окно лога при расчете параметров формы поверхности

Fig. 5. Software implementation of the shape calculation algorithm:

а – program user interface; *б* – log window when calculating surface shape parameters



а *б*

Рис. 6. Круглограммы распределения погрешности формы поверочных сечений:
а – сечение № 1; *б* – сечение № 4

Fig. 6. Round diagrams of the shape deviation distribution of the verification sections:
а – section No. 1; *б* – section No. 4

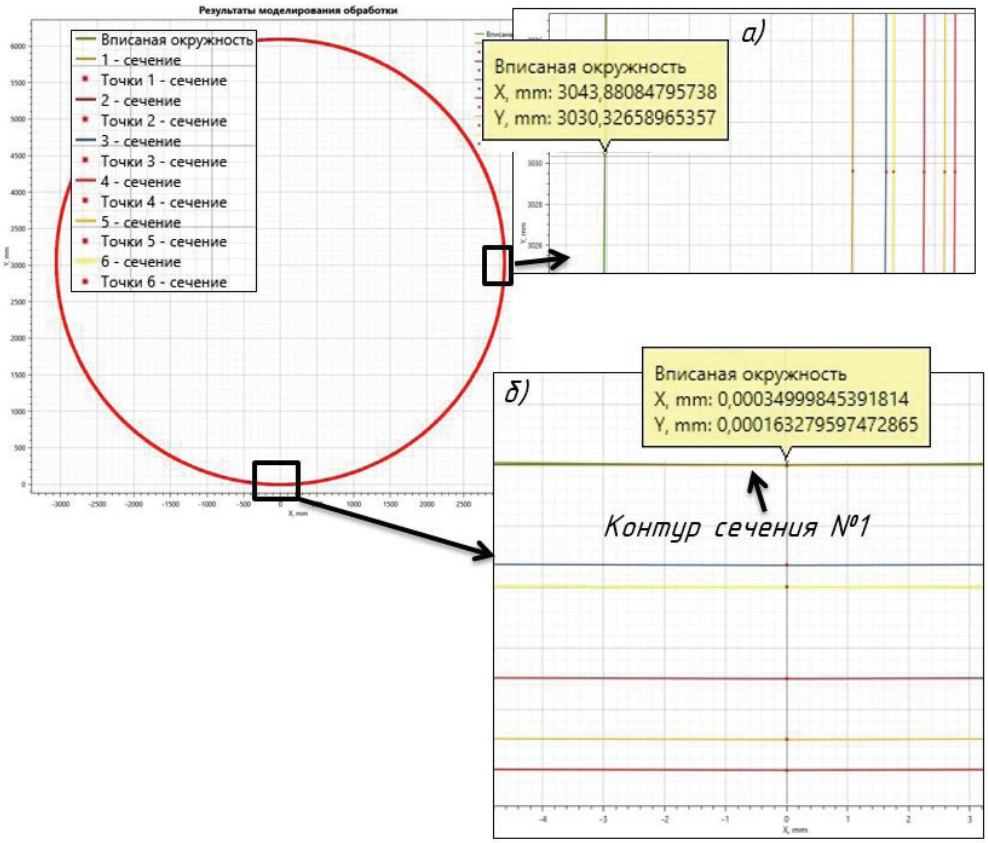


Рис. 7. Совмещенная диаграмма контуров сечений и вписанного цилиндра:
а – участок графика в районе минимальной погрешности формы поверхности; *б* – участок графика в районе максимальной погрешности формы поверхности

Fig. 7. Combined diagram of the contours of the sections and the inscribed cylinder:
а – plot of the graph in the region of the minimum error in the shape of the surface; *б* – plot of the graph in the region of the maximum error in the shape of the surface

данным о ее геометрических параметрах точности формы.

Из анализа данных следует, что сечение № 1 имеет наименьшую величину параметра Δ^1_{ECR}, а также Δ^1_{TFEC}. При этом сечение № 2 имеет одну из наименьших погрешностей формы. Тем самым согласно предложенной схеме обработки в качестве возможного участка поверхности для базирования обрабатывающего модуля принимается участок поверхности от сечения № 1 к сечению № 2. При этом ввиду принятой ширины опорных роликов обрабатывающего модуля для основной технологической базы на первом переходе принят участок шириной 100 мм от сечения № 1. Далее данный участок обозначен как 1-М.

В процессе 1-го технологического перехода обрабатывающий модуль базируется по необработанной поверхности, а так как профиль продольного сечения на данном участке имеет непрямолинейные образующие, то расчетная траектория перемещения НОУК будет отличаться от фактической. Поэтому для маршрута механической обработки приняты следующие правила.

Расчет траектории перемещения НОУК необходимо производить по сечению основной технологической базы с минимальной величиной Δ^k_{TFEC}. По данному сечению также рассчитывается $h^I_{\text{р}\_\max}$.

При расчете величин $^{I\ k\ \ k}$ для исключения возможности превышения максимально допустимой величины $t^{per}_{\max}$ в случае сильного износа поверхности катания бандажа необходимо соответствующее уменьшение $t^{per}_{\max}$.

После выполнения 1-го перехода следует выполнить операцию определения геометрических параметров точности формы обработанных участков поверхности и произвести корректировку расчета маршрута механической обработки по полученным данным.

В целях сокращения основного технологического времени обработки рациональным является проведение механической обработки двух небольших и смежных участков поверхности (участки 1-М и М-2) до получения на одном из них требуемых параметров точности формы. После получения участка поверхности с требуемой величиной погрешности формы она принимается за основную технологическую базу для обработки всей оставшейся поверхности. Тем самым на 1-м переходе произведен расчет и моделирование обработки смежного основной технологической базе участка поверхности шириной 100 мм – М-2 (рис. 8).

Согласно расчету параметров технологических режимов маршрута механической обработки в разработанном программном обеспечении для 1-го перехода максимальная глубина резания $t_{k\_\max}$ обрабатываемого участка 1-М составила 2,247 мм с $h^I_{\text{р}\_\max} = 56,21$ мм. При этом величина Δ^2_{ECR} обработанного участка должна уменьшиться на 0,48 мм и составить $\Delta^2_{ECR} = 11,527$ мм.

По результатам виртуального моделирования процесса механической обработки в САПР NX для величины $h^I_{\text{р}\_\max}$ с последующим определением геометрических параметров точности формы максимальная глубина резания $t_{k\_\max}$ составила 1,957 мм (рис. 9, *а*). Величина Δ^2_{ECR} обработанного участка уменьшилась на 0,34 мм и составила $\Delta^2_{ECR} = 11,667$ мм (рис. 9, *б*). Соответственно фактические выходные параметры геометрической точности формы обработанного участка 1-М незначительно хуже расчетных. Полученные данные переданы для корректировки маршрута механической обработки.

Расчет и моделирование процесса обработки показали, что применение предложенной схемы обработки позволяет на каждом отдельном переходе исправлять геометрическую точность формы только до конечной величины. Так, например, на 2-м переходе максимально достигаемая величина Δ^1_{ECR} обрабатываемого участка 1-М составила 11,365 мм (рис. 10, *а*). При этом в случае превышения величины $h^2_{\text{р}\_\max}$ более расчетной наблюдается уменьшение радиуса вписанного цилиндра Cc.

Дальнейший маршрут обработки также предполагал обработку двух смежных участков поверхности 1-М и М-2 между сечениями №1 и № 2

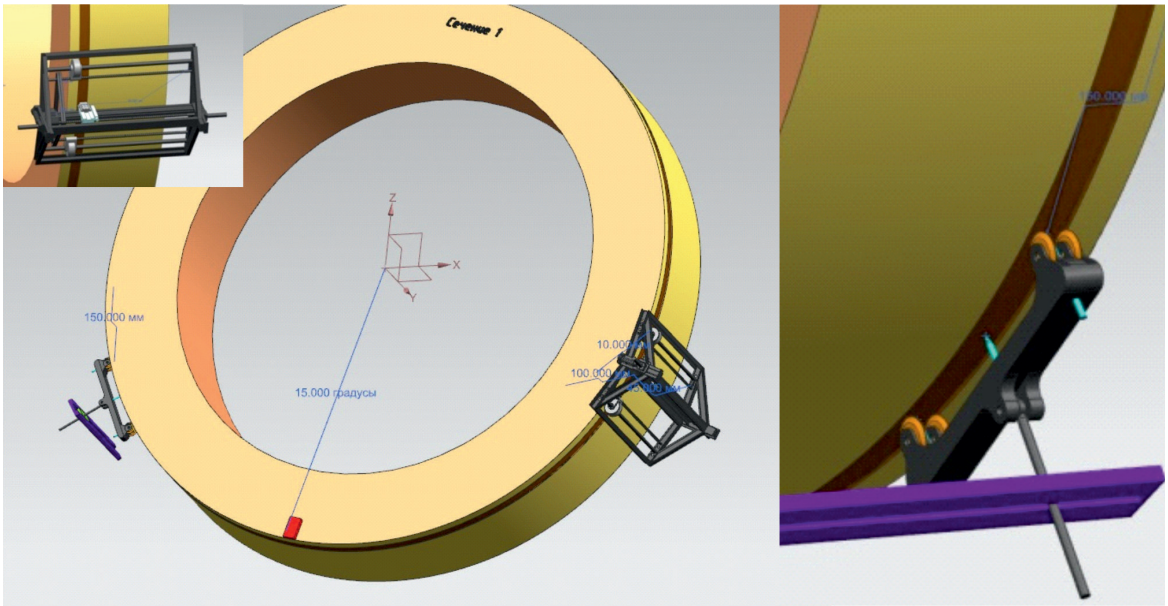


Рис. 8. Результат моделирования механической обработки после 1-го перехода

Fig.8. Machining simulation result after first transition

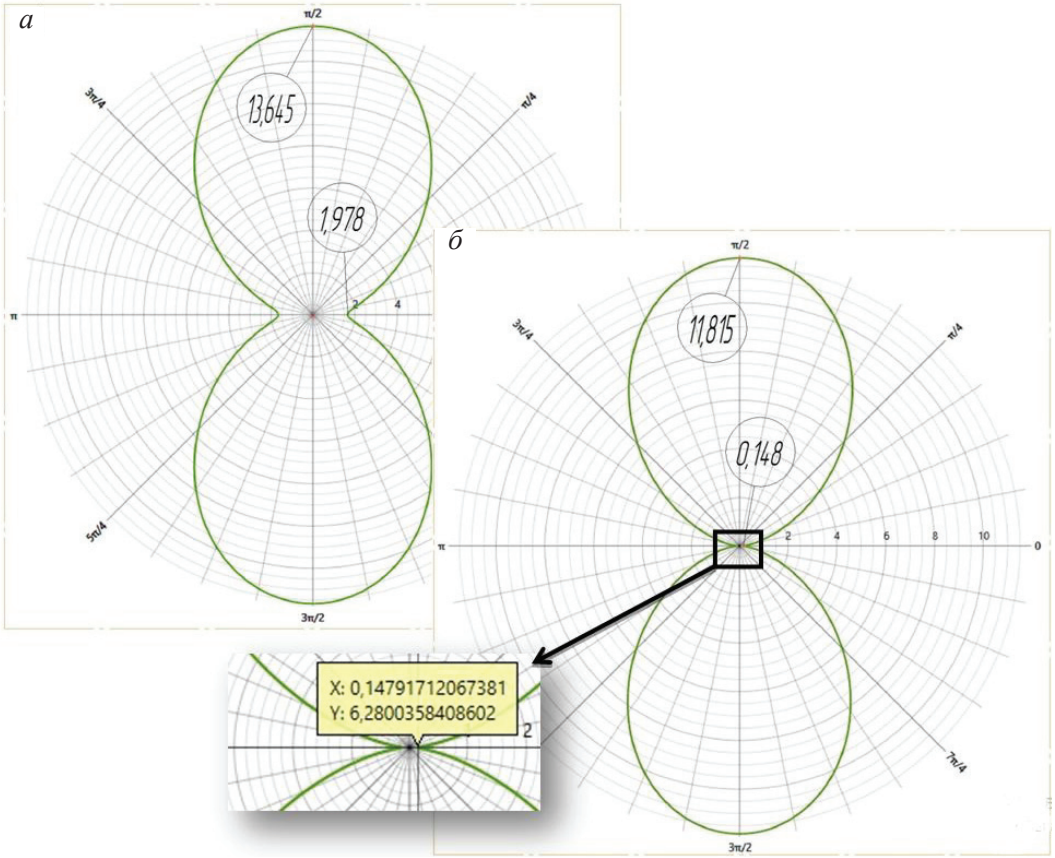


Рис. 9. Круглограмма погрешности формы контура обработанного участка поверхности на 1-м переходе:

а – до обработки; *б* – после обработки

Fig. 9. Round diagram of the shape deviation of the contour of the processed surface area at the 1st transition:

a – before processing; *б* – after processing

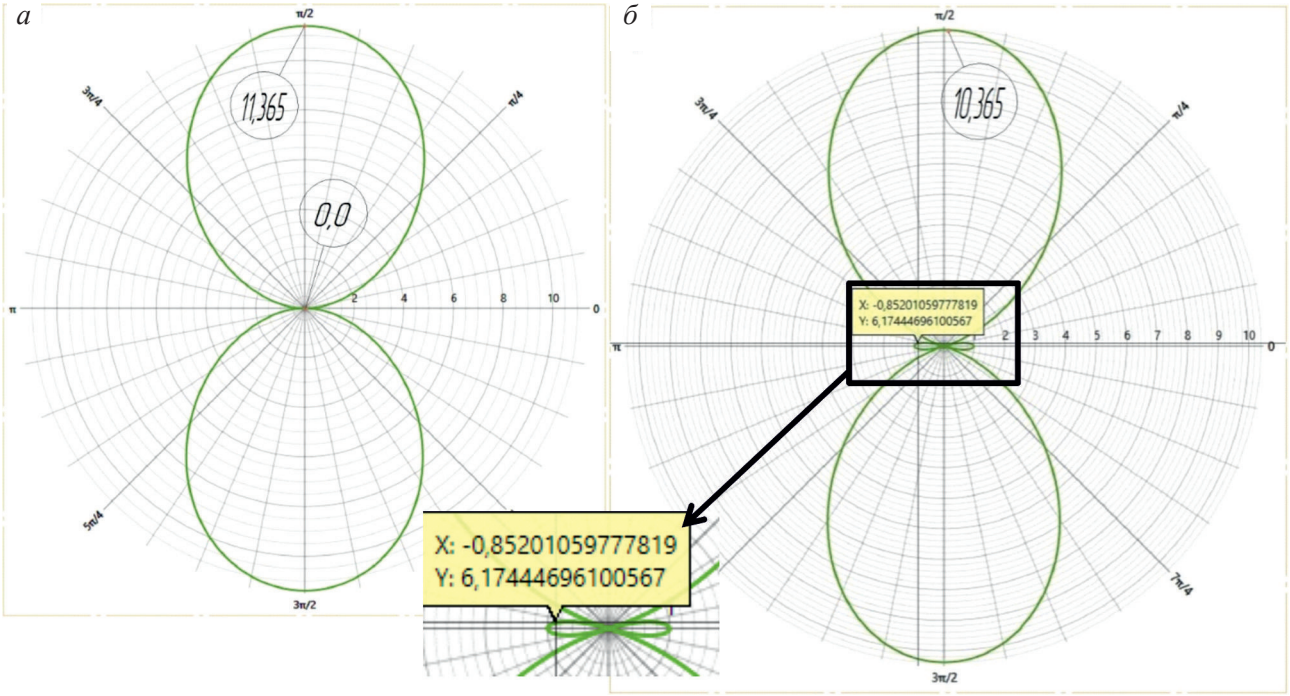


Рис. 10. Круглограмма погрешности формы контура поперечного сечения обработанного участка после 2-го перехода:

а – $h^2_{p\_max} = 56,2$ мм; *б* – $h^2_{p\_max} = 57,2$ мм

Fig. 10. Round diagram of the shape deviation of the cross-sectional contour of the machined area after the 2nd transition:

a – $h^2_{p\_max} = 56,2$ mm; *б* – $h^2_{p\_max} = 57,2$ mm

до достижения нормативной величины Δ^k_{ECR}. При этом перед каждым технологическим переходом производилась смена основной технологической базы на обработанный на предыдущем переходе участок $\left(\text{с минимальной величиной } \Delta^k_{ECR}\right)$.

Согласно произведенным расчетам нормативная величина радиального биения достигается на участке М-2 за 51 технологический переход (согласно ОСТ 22-170–87 для вварного бандажа цементной печи диаметром Ø6,1 м величина $\Delta^{\text{нормат}}_{ECR} = 3,04$ мм). После выполнения 51-го перехода на участке М-2 величина $\Delta^{M-2}_{ECR} = 2,998$ мм, а на участке 1-М величина $\Delta^{1-M}_{ECR} = 3,082$ мм. Тем самым участок поверхности М-2 далее будет использован для последнего технологического перехода, предполагающего механическую обработку всей оставшейся части поверхности. На рис. 11 представлен график изменения величины Δ^k_{ECR} поперечных сечений обрабатываемых участков поверхности 1-М и М-2 с 1-го по 51-й включительно переход.

Перед выполнением последнего перехода произведена операция по определению геометрических параметров точности формы участка поверхности М-2, принимаемого в качестве основной технологической базы для 52-го перехода. Необходимость выполнения данной операции обусловлена тем, что в случае превышения фактической величины погрешности формы на данном участке возможно недостижение требуемых параметров геометрической точности формы поверхности катания за расчетное количество рабочих ходов на последнем переходе.

По результатам виртуального моделирования процесса механической обработки в САПР NX сделан вывод, что фактические параметры геометрической точности формы участка М-2 соответствуют расчетным. Тем самым корректировка маршрута механической обработки не потребовалась.

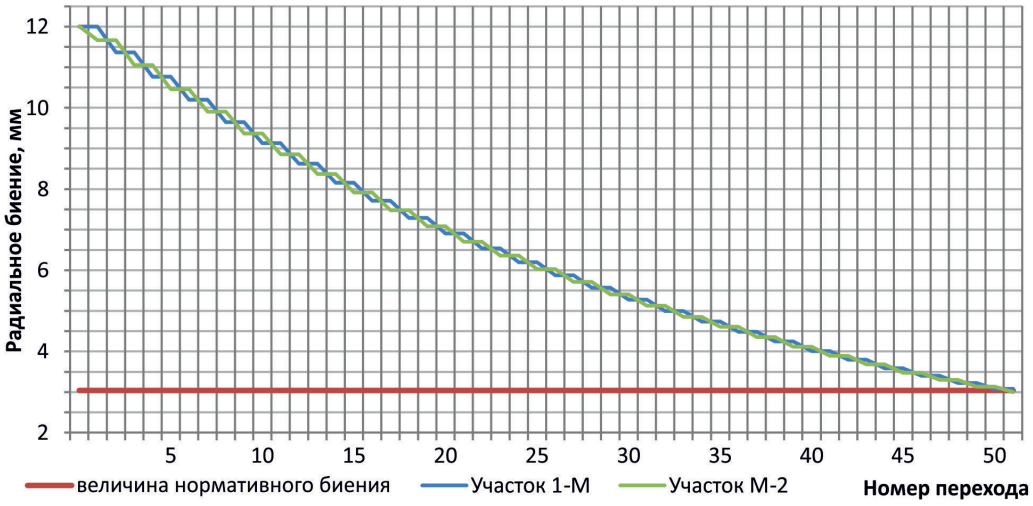


Рис. 11. График изменения величины Δ_{ECR}^{k} поперечных сечений обрабатываемых участков поверхности 1-М и М-2 с 1-го по 51-й включительно переход

Fig. 11. Graph of the change in the Δ_{ECR}^{k} value of the cross sections of the processed surface areas 1-M and M-2 from the 1st to the 51st transition inclusive

Согласно расчетам на 52-м переходе для обеспечения нормативной точности формы всей оставшейся поверхности требуется произвести 14 рабочих ходов, характеризуемых различной величиной вылета режущего инструмента для каждого участка поверхности. При этом для обеспечения требуемого качества поверхности (Ra 6,3…12,5 мкм) введен 15-й рабочий ход, на котором глубина обработки составила 0,07 мм.

На рис. 12 представлено расчетное распределение максимального припуска на обработку для каждого обрабатываемого участка и рабочего хода.

Моделирование и определение геометрических параметров точности формы поверхности катания на 52-м переходе при помощи САПР подтвердило достоверность расчетных режимов обработки и получаемых величин погрешности.

Основное технологическое время, необходимое для обработки по указанному маршруту, с учетом обработки до упора и частоты вращения бандажа ~ 1 об/мин составит:

1-й переход:

$$\frac{2\,\text{прохода}\cdot 100\,\text{мм}}{50\,\text{мм/об}\cdot 1\,\text{об/мин}}+\frac{2\,\text{об}\cdot 2\,\text{прохода}}{1\,\text{об/мин(на\_врезание\_и\_выход)}}=8\,\text{мин}; \quad (13)$$

2-51-й переходы:

$$\frac{5\,\text{проходов}\cdot 100\,\text{мм}}{50\,\text{мм/об}\cdot 1\,\text{об/мин}}+\frac{2\,\text{об}\cdot 50\,\text{проходов}}{1\,\text{об/мин}}=200\,\text{мин}; \quad (14)$$

52-й переход:

$$\frac{2\,\text{прохода}\cdot 100\ \text{мм}}{50\,\text{мм/об}\cdot 1\,\text{об/мин}}+\frac{1\,\text{проход}\cdot 600\,\text{мм}}{50\,\text{об/мин}\cdot 1\,\text{об/мин}}+\frac{14\,\text{проходов}\cdot 800\,\text{мм}}{50\ \text{об/мин}\cdot 1\ \text{об/мин}}+$$

$$+\frac{2\,\text{об}\cdot 15\,\text{проходов}}{1\ \text{об/мин}}=270\,\text{мм}. \quad (15)$$

Общее время обработки составило 478 мин, или 7,97 часа.

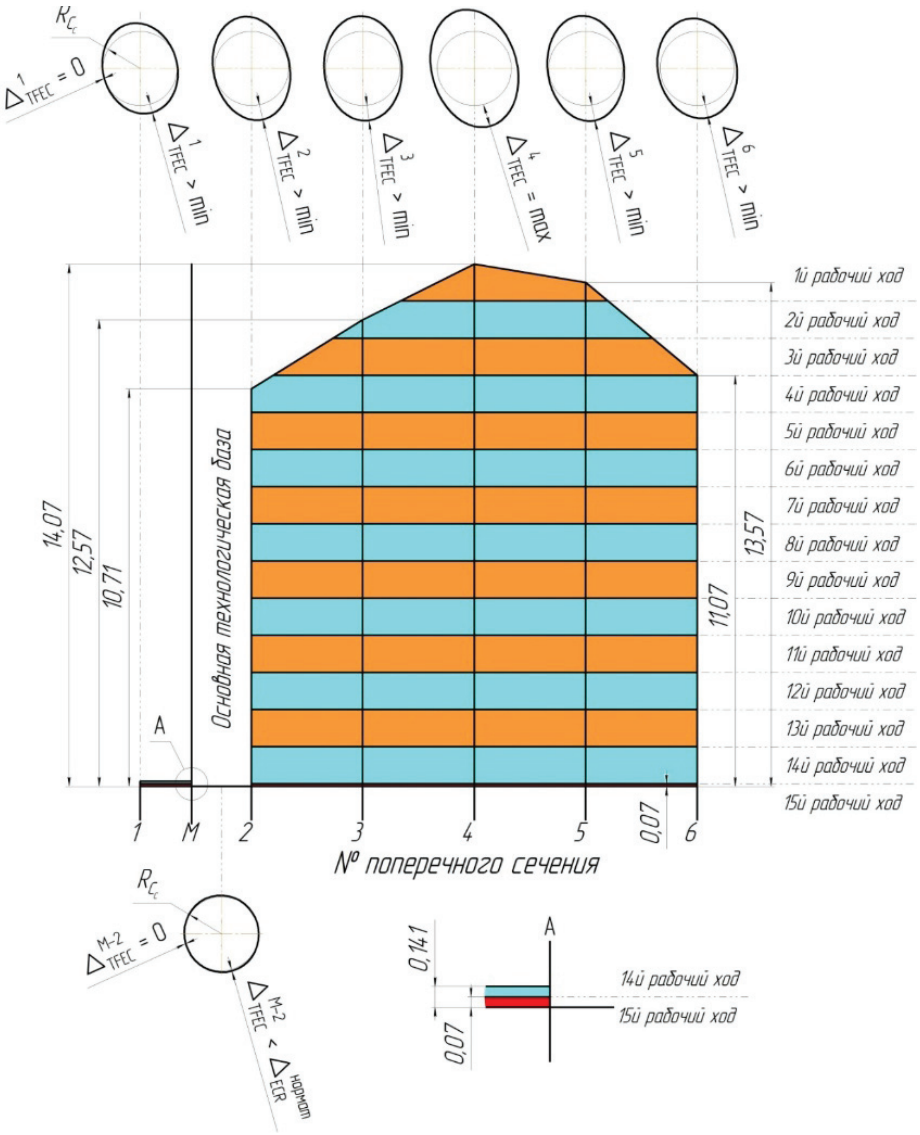


Рис. 12. Распределение максимальных припусков на обработку по участкам поверхности на рабочие ходы 52 перехода

Fig. 12. Distribution of maximum allowances for processing a surface area on a working stroke of the 52nd transition

Использование виртуальной модели при назначении технологического припуска при механической обработке

Алгоритм измерения и определения параметров точности формы поперечного сечения может быть реализован в обрабатывающем станочном модуле. Укрупненная схема выполнения предложенной технологии делится на два основных этапа: расчет и моделирование маршрута обработки, выполнение механической обработки и заранее установленных операций определения точности формы.

Для расчета технологического припуска производится анализ обрабатываемой поверхности по полученным на этапе измерения данным о ее параметрах.

Далее по результатам расчета определяется текущая на переходе технологическая база для очередного прохода, и на основании расчетов проводится настройка параметров обрабатывающего модуля.

После механической обработки выполняется контрольное изменение геометрических параметров формы и определяется необходимость корректировки технологического маршрута.

Исходными данными для расчета являются измеряемая поверхность и нормативные требования к поверхности.

Существенным отличием данной технологии является то, что обработка ведется до параметров максимального вписанного кругового цилиндра с учетом нормативных требований, но при необходимости можно обрабатывать и точнее.

Обработка производится до тех пор, пока требуемая точность формы не достигнет нужного значения. По результатам виртуального моделирования процесса механической обработки в САПР NX фактические параметры точности формы соответствуют расчетным. Тем самым корректировка маршрута механической обработки не потребовалась.

Разработка и изготовление контрольно-измерительного устройства

Для реализации приведенного выше алгоритма измерения параметров точности формы разработан экспериментальный образец измерительного устройства [23], схема которого представлена на рис. 13 [23].

На рис. 14 и 15 показана реализованная конструкция экспериментального измерительного устройства контроля формы поверхности на базе датчиков и электронных компонентов отечественного производителя [24].

Экспериментальная установка в сборе (рис. 15) состоит из плиты основания *1*, на которой шарнирно установлены одна роликоопора *2* и экспериментальная модель измерительного устройства *3*. Модель тела *4* наружной поверхностью опирается на роликоопору и щупы измерительного устройства поверхности. Боковой поверхностью модель тела опирается на регулируемые упоры плиты основания.

После сборки и подключения модели измерительного устройства к компьютеру *5* произведена отладка измерительного алгоритма. При данной компоновке обеспечивается необходимое количество степеней свободы модели поверхности с возможностью свободного её вращения. Данная экспериментальная установка позволяет имитировать реальный процесс технологического вращения опоры технологического барабана, установленного на две роликоопоры, с возможностью определения параметров точности формы поверхности катания экспериментальной моделью измерительного устройства. Контроль

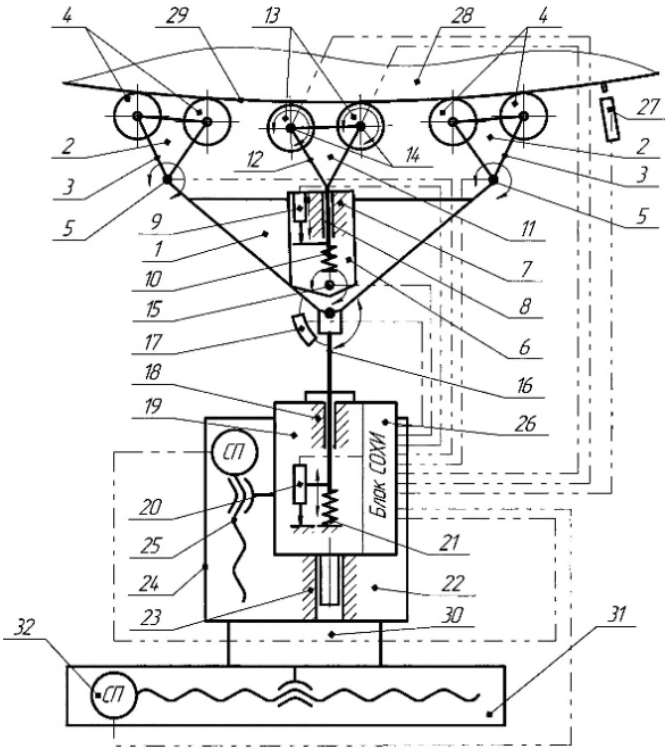


Рис. 13. Устройство для измерения параметров формы изделия:

1 – корпус; *2* – базовые опоры; *3* – основание; *4* – ролик; *5*, *14*, *15*, *17* – датчики угловых перемещений; *6* – качалка; *7*, *18*, *23* – направляющие; *8* – шток, *9* – датчик линейных перемещений; *10*, *21* – пружина сжатия; *11* – измерительная опора, *12* – основание измерительной опоры; *13* – ролик; *16* – штанга; *19* – рама; *20* – датчик линейных перемещений; *22*, *24* – механизм поперечного перемещения; *25*, *32* – электрический привод; *26* – блок сбора, обработки и хранения информации, *27* – датчик полного оборота; *28* – деталь; *29* – поверхность детали; *30* – крепление; *31* – устройство продольного перемещения; *32* – силовой привод перемещений [23]

Fig. 13. Device for measuring product shape parameters:

1 – case; *2* – basic supports; *3* – base; *4* – roller; *5*, *14*, *15*, *17* – angular displacement sensors; *6* – rocking chair; *7*, *18*, *23* – guides; *8* – rod; *9* – linear displacement sensor; *10*, *21* – compression spring; *11* – measuring support, *12* – base of the measuring support; *13* –roller; *16* – rod; *19* – frame; *20* – linear displacement sensor; *22*, *24* – transverse movement mechanism; *25*, *32* – electric drive; *26* – block for collecting, processing and storing information, *27* – full turn sensor; *28* – detail; *29* – part surface; *30* – mount; *31* – longitudinal movement device; *32* – power drive displacements [23]

точности настройки и юстировки произведен по эталонной поверхности с известным радиусом кривизны, а также концевыми мерами.

Исходя из принятых принципов и подходов предложенная технология представляет собой следующую последовательность действий.

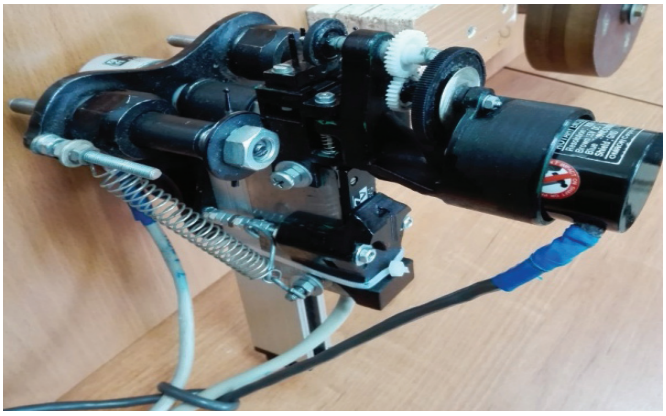


Рис. 14. Экспериментальный образец измерительного устройства с реализованным блоком контроля

Fig. 14. An experimental sample of the measuring device with the use of a control unit

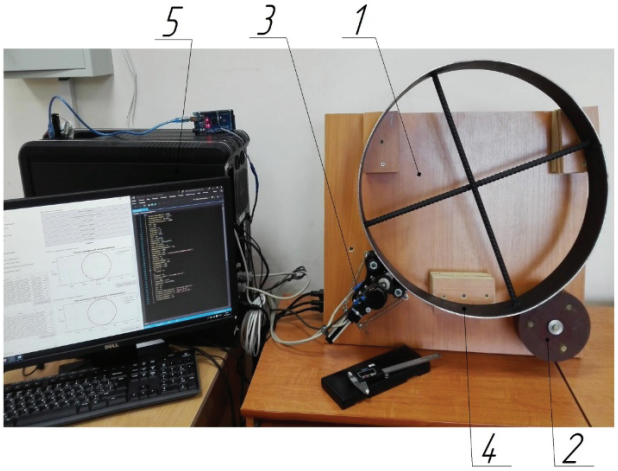


Рис. 15. Измерение на лабораторном образце:

1 – плита основания; *2* – роликоопора; *3* – измерительное устройство; *4* – модель тела вращения; *5* – компьютер

Fig. 15. Measurement on a laboratory sample:

1 – base plate; *2* – roller support; *3* – measuring device; *4* – model of a body of revolution; *5* – computer

1. Плановое измерение поверхности катания бандажа с целью выявления превышения допустимых величин параметров точности формы:

- 3-мерная цифровая реконструкция поверхности;
- расчет параметров точности формы поверхности;
- запись и сохранение данных, определение необходимости механической обработки.

2. Моделирование процесса формообразования обрабатываемой поверхности для многопроходной механической обработки:

- обработка данных измерения и параметров обрабатывающего модуля;
- расчет, построение и выбор оптимального маршрута механической обработки, а также технологических режимов обработки на каждый технологический переход;
- запись и сохранение данных.

3. Выполнение механической обработки поверхности:

- выполнение многопроходной механической обработки по рассчитанному маршруту механической обработки;
- выполнение контрольных промежуточных измерений с определением параметров точности формы поверхности или её части при необходимости;
- корректировка маршрута обработки по данным контрольных измерений.

4. Итоговое контрольное измерение параметров точности формы поверхности. Корректировка маршрута механической обработки либо окончание выполнения механической обработки.

Выводы

Представленные методы и виртуальное моделирование измерений для восстановительной обработки позволяют существенно сократить время обработки по сравнению с технологией с активным контролем формы, а также с традиционной методикой, при которой припуск снимается с корректировкой после каждого прохода. Отличие состоит в том, что заранее рассчитывается маршрут обработки и измерение с корректировкой производится только по мере необходимости.

Определено, что при обеспечении единой технологической базы на каждый отдельный технологический переход в рамках мобильной технологии механической обработки поверхности катания бандажей технологических барабанов повышается точность и скорость обработки. Кроме того, обеспечивается наследование параметров точности для всей поверхности, что позволяет получить единый профиль продольного сечения всей поверхности. При этом в случае базирования по участку поверхности с минимальной величиной погрешности формы сокращается количество технологических рабочих ходов,

необходимых для достижения требуемой точности формы поверхности.

Обработка всей оставшейся части поверхности, кроме участка под базирование, на каждом технологическом переходе является существенно менее эффективной, чем обработка только участка поверхности под перебазирование до получения на обработанном участке нормативных параметров точности. После этого базирование осуществляется по полученному участку поверхности с обработкой всей оставшейся поверхности. В данном случае (для виртуальной модели) обработка 800 мм между сечениями заняла 15 рабочих ходов, а в случае обработки всей поверхности на каждом переходе заняла бы 52 рабочих хода.

При использовании виртуального моделирования, способа контроля и метода определения припуска могут быть получены технические результаты и решены задачи повышения производительности и обеспечения точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах.

Список литературы

1. Phillips Kiln Services. – URL: http://www.pkse.co.uk (accessed: 13.04.2022).

2. *Boateng A.A.* Rotary kilns: transport phenomena and transport processes. – Elsevier, 2015. – 390 p. – ISBN 9780128038536.

3. Design and mechanical behavior analysis of two-stall cement rotary kiln cylinder / W. Wei, Y. Peng, L. Du, Y. Cai // International Journal of Performability Engineering. – 2020. – Vol. 16, iss. 6. – P. 883–895. – DOI: 10.23940/ijpe.20.06.p7.883895.

4. Anti-fatigue optimization of kiln shell at intermittent multi-body contact state / X. Lei, Y. Xiao, G. Chen, Y. Liu, X. Zhao // Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban) = Journal of Sichuan University. Engineering Science Edition. – 2014. – Vol. 46, iss. 6. – P. 185–190. – In Chinese.

5. *Wei G., Tan Q.* Measurement of shaft diameters by machine // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50, iss. 19. – P. 3246–3253. – DOI: 10.1364/AO.50.003246.

6. *Syusyuka E.N., Amineva E.Kh.* Control of mobile equipment for the processing of marine shaft lines // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012083. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012083.

7. *Syusyuka E.N.* Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.

8. Rotary kiln cylinder deformation measurement and feature extraction based on EMD method / K. Zheng, Y. Zhang, C. Zhao, L. Liu // Engineering Letters . – 2015. – Vol. 23, iss. 4. – P. 283–291.

9. *Mogilny S., Sholomitskii A.* Precision analysis of geometric parameters for rotating machines during cold alignment // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1709–1715. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.702.

10. *Li M., Yu J.P.* Status and development of geometric measurement in industry // Chinese Journal of Scientific Instrument. – 2017. – Vol. 38, iss. 12. – P. 2959–2971. – In Chinese.

11. Identification and kinematic calculation of laser tracker errors / J. Conte, J. Santolaria, A.C. Majarena, A. Brau, J.J. Aguilar // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 63. – P. 379–387. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.190.

12. *Farooqui S.A., Doiron T., Sahay C.* Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method // Measurement. – 2009. – Vol. 42, iss. 4. – P. 524–531. – DOI: 10.1016/j.measurement.2008.09.008.

13. *Koziołek S., Derlukiewicz D., Ptak M.* Design process innovation of mechanical objects with the use of design for Six Sigma methodology // Solid State Phenomena. – 2010. – Vol. 165. – P. 274–279. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.165.274.

14. A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces / Y. Liu, C.F. Cheung, X. Feng, C.J. Wang, R.K. Leach // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 54. – P. 60–69. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.05.002.

15. *Ramaswami H., Kanagaraj S., Anand S.* An inspection advisor for form error in cylindrical features // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 40. – P. 128–143. – DOI: 10.1007/s00170-007-1321-4.

16. Variable optical null based on a yawing CGH for measuring steep acylindrical surface / J. Peng, D. Chen, H. Guo, J. Zhong, Y. Yu // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, iss. 16. – P. 20306–20318. – DOI: 10.1364/OE.26.020306.

17. Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part's axis on the measurement results of its diameters Z. Zhao, B. Li, G. Zhang, H. Yu, M. Shang // Measurement. – 2019. – Vol. 138. – P. 232–239. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.085.

18. *Stamboliska Z., Rusinski E., Moczko P.* Proactive condition monitoring of low-speed machines. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – P. 53–68. – ISBN 978-3-319-10493-5. – ISBN 3319104934.

19. *Li X., Shen Y., Wang S.* Dynamic modeling and analysis of the large-scale rotary machine with multi-

supporting // Shock and Vibration. – 2011. – Vol. 18. – P. 53–62. – DOI: 10.1155/2011/541049.

20. An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder / K. Zheng, Y. Zhang, L. Liu, C. Zhao // Tehnicki Vjesnik. – 2017. – Vol. 24 (5). – P. 1297–1305. – DOI: 10.17559/TV-20150426160032.

21. *Žiga A., Karač A., Vukojević D.* Analytical and numerical stress analysis of the rotary kiln ring // Tehnicki Vjesnik. – 2013. – Vol. 20. – P. 941–946.

22. *Guo Y., Wang Y., Liu X.* Real-time optical detection system for monitoring roller condition with automatic error compensation // Optics and Lasers in Engineering. – 2014. – Vol. 53. – P. 69–78. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.007.

23. Патент № 161400 Российская Федерация, МПК G 01 B 5/20 (2006.01). Измерительное устройство для определения формы поверхностей крупногабаритных деталей – тел вращения: № 2015152710/28: заявл. 08.12.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11 / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова, А.В. Гринек; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова.

24. Способ контроля параметров геометрической точности судовых валопроводов / А.В. Гринек, С.П. Тимофеев, С.И. Кондратьев, А.В. Хуртасенко // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 3, т. 1. – С. 90–97. – DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.011.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 6–24
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Machining technology, digital modelling and shape control device for large parts

Sergey Timofeev [1, a], *Anna Grinek* [2, b, *], *Andrej Hurtasenko* [3, d], *Igor Boychuk* [2, c]

[1] Limited Liability Company «Promagro», 370a Rzhevskoe shosse, Shebekino, 309290, Russian Federation
[2] Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin's avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation
[3] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-6740-5163, timofeevsp@inbox.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-7953-3501, grinyokann@gmail.com,
[c] https://orcid.org/0000-0002-2614-5457, hurtintbel@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-1996-2184, boychuk@ieee.org

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 16 February 2022
Revised: 14 March 2022
Accepted: 23 March 2022
Available online: 15 June 2022

Keywords:
Digital simulation
Large parts
Riding ring
Shape measurement
Mechanical restoration

ABSTRACT

Introduction. The development of a method for controlling the accuracy parameters of large axisymmetric bodies is an urgent task that is being solved by specialists from various industries. Application for adjustment and correction of machining based on the measurement of surface shape parameters directly during machining is shown. **Purpose of work** is to improve mobile processing technologies using special measuring devices and processing module. For this, the problems of development and analysis of mathematical models that describe the process of basing and machining of a riding ring as a cylindrical object with a non-stationary axis of rotation is solved. A study of the methodology is carried out, control schemes are designed, and equipment for processing mobile devices is developed. **The methods of research** are the analysis of the developed mathematical models, taking into account the assignment of effective technological modes. Three-dimensional and simulation modeling of processing, hardware-software implementation of proposed solutions, and statistical processing of measurement results are carried out. **Results and discussion.** The algorithm and methodology are tested with a three-dimensional simulation model. The presented methodology for measuring and calculating the allowance for mechanical restoration can significantly reduce machining time compared to active form control and compared to the traditional method of assigning an allowance for machining. The measurement and adjustment of the allowance based on the measurement data is not carried out after each measurement, but only in the case of transition to finishing transitions or for accuracy control. It is determined that by providing a single technological base for each individual technological transition within the framework of the mobile technology of machining of the rolling surface of the riding rings of technological drums, the accuracy and speed of processing increase. An original design of the device for monitoring parameters is developed; an experimental assembly and a laboratory model of the riding ring are made.

For citation: Timofeev S.P., Grinek A.V., Hurtasenko A.V., Boychuk I.P. Machining technology, digital modelling and shape control device for large parts. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 6–24. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24. (In Russian).

References

1. Phillips Kiln Services. Available at: http://www.pkse.co.uk (accessed 13.04.2022).
2. Boateng A.A. *Rotary kilns: transport phenomena and transport processes*. Elsevier, 2015. 390 p. ISBN 9780128038536.
3. Wei W., Peng Y., Du L., Cai Y. Design and mechanical behavior analysis of two-stall cement rotary kiln cylinder. *International Journal of Performability Engineering*, 2020, vol. 16, iss. 6, pp. 883–895. DOI: 10.23940/ijpe.20.06.p7.883895.
4. Lei X., Xiao Y., Chen G., Liu Y., Zhao X Anti-fatigue optimization of kiln shell at intermittent multi-body contact state. *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban) = Journal of Sichuan University. Engineering Science Edition*, 2014, vol. 46, iss. 6, pp. 185–190. (In Chinese).

*** Corresponding author**
Grinek Anna V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Admiral Ushakov State Maritime University,
93 Lenin's avenue,
353918, Novorossiysk, Russian Federation
Tel.: +7-960-637-38-82, **e-mail**: grinyokann@gmail.com

5. Wei G., Tan Q. Measurement of shaft diameters by machine vision. *Applied Optics*, 2011, vol. 50, iss. 19, pp. 3246–3253. DOI: 10.1364/AO.50.003246.

6. Syusyuka E.N., Amineva E.Kh. Control of mobile equipment for the processing of marine shaft lines. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012083.

7. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.

8. Zheng K., Zhang Y., Zhao C., Liu L. Rotary kiln cylinder deformation measurement and feature extraction based on EMD method. *Engineering Letters*, 2015, vol. 23, iss. 4, pp. 283–291.

9. Mogilny S., Sholomitskii A. Precision analysis of geometric parameters for rotating machines during cold alignment. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1709–1715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.702.

10. Li M., Yu J.P. Status and development of geometric measurement in industry. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, vol. 38, iss. 12, pp. 2959–2971. (In Chinese).

11. Conte J., Santolaria J., Majarena A.C., Brau A., Aguilar J.J. Identification and kinematic calculation of laser tracker errors. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 379–387. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.190.

12. Farooqui S.A., Doiron T., Sahay C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method. *Measurement*, 2009, vol. 42, iss. 4, pp. 524–531. DOI: 10.1016/j.measurement.2008.09.008.

13. Koziołek S., Derlukiewicz D., Ptak M. Design process innovation of mechanical objects with the use of design for Six Sigma methodology. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 165, pp. 274–279. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.165.274.

14. Liu Y., Cheung C.F., Feng X., Wang C.J., Leach R.K. A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces. *Precision Engineering*, 2018, vol. 54, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.05.002.

15. Ramaswami H., Kanagaraj S., Anand S. An inspection advisor for form error in cylindrical features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 40, pp. 128–143. DOI: 10.1007/s00170-007-1321-4.

16. Peng J., Chen D., Guo H., Zhong J., Yu Y. Variable optical null based on a yawing CGH for measuring steep acylindrical surface. *Optics Express*, 2018, vol. 26, iss. 16, pp. 20306–20318. DOI: 10.1364/OE.26.020306.

17. Zhao Z., Li B., Zhang G.,.Yu H, Shang M. Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part's axis on the measurement results of its diameters. *Measurement*, 2019, vol. 138, pp. 232–239. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.085.

18. Stamboliska Z., Rusinski E., Moczko P. *Proactive condition monitoring of low-speed machines*. Cham, Springer International Publishing, 2015, pp. 53–68. ISBN 978-3319104935, ISBN 3319104934.

19. Li X., Shen Y., Wang S. Dynamic modeling and analysis of the large-scale rotary machine with multi-supporting. *Shock and Vibration*, 2011, vol. 18, pp. 53–62. DOI: 10.1155/2011/541049.

20. Zheng K., Zhang Y., Liu L., Zhao C. An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder. *Tehnicki Vjesnik*, 2017, vol. 24 (5), pp. 1297–1305. DOI: 10.17559/TV-20150426160032.

21. Žiga A., Karač A., Vukojević D. Analytical and numerical stress analysis of the rotary kiln ring. *Tehnicki Vjesnik*, 2013, vol. 20, pp. 941–946.

22. Guo Y., Wang Y., Liu X. Real-time optical detection system for monitoring roller condition with automatic error compensation. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 53, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.007.

23. Timofeev S.P., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N., Grinek A.V. *Izmeritel'noe ustroistvo dlya opredeleniya formy poverkhnostei krupnogabaritnykh detalei – tel vrashcheniya* [The measuring device for determining the surface shape of large size parts of rotation type]. Patent RF, no. 161400, 2016.

24. Grinek A.V., Timofeev S.P., Kondrat'ev S.I., Hurtasenko A.V. Sposob kontrolya parametrov geometricheskoi tochnosti sudovykh valoprovodov [Method of controlling geometric accuracy for ship shafts]. *Morskie intellektual'nye tekhnologi = Marine Intellectual Technologies*, 2020, no. 3, pt. 1, pp. 90–97. DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.011.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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). 2022 Том 24 № 2 с. 25–38
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Теоретическое моделирование процесса промывки межэлектродного пространства при копировально-прошивной электроэрозионной обработке изделий, выполненных из полимерных композитных материалов

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

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

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.1.9

История статьи:
Поступила: 31 марта 2022
Рецензирование: 06 апреля 2022
Принята к печати: 12 апреля 2022
Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:
Полимерные композитные материалы
Копировально-прошивная электроэрозионная обработка
Промывка
Шлам

Финансирование:
Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-566.2021.4

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Полимерные композитные материалы (ПКМ) используются для повышения механических свойств и увеличения сроков эксплуатации годных изделий. Для обработки изделий, выполненных из ПКМ, целесообразно применение электрофизических методов обработки. Одним из таких методов является копировально-прошивная электроэрозионная обработка (КПЭЭО). Применение таких методов обработки ПКМ обусловлено их высокими физико-механическими свойствами и сложностью обработки лезвийными методами. Ввиду того, что одним из элементов ПКМ является связующее – эпоксидная смола, которая в процессе электроэрозионной обработки разрушается на кромках получаемых отверстий и пазов, ПКМ можно считать труднообрабатываемым материалом. Во время КПЭЭО отверстий в изделиях из ПКМ происходит повышение температуры, зачастую вызванное неэффективным охлаждением в зоне обработки. Статья посвящена теоретическому моделированию в пакете Ansys, позволяющему оценить влияние способа промывки на эффективность КПЭЭО изделий из ПКМ на основе численного моделирования в программных системах конечно-элементного анализа. Целью работы является повышение производительности процесса КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ. **Методы.** Экспериментальные исследования проводились по методу классического эксперимента на копировально-прошивном электроэрозионным станке Smart CNC. Заготовка подвергалась обработке при постоянном напряжении $U = 50$ В, времени включения импульса $T_{on} = 100$ мкс и силе тока $I = 10$ А. Для теоретического моделирования потока использовалось программное обеспечение ANSYS CFX 20.1. Моделирование распределения потоков проводилось при трех значениях глубины обработки (2, 10, 15 мм), а также при трех значениях угла наклона форсунок (15°, 45°,75°). **Результаты и обсуждения.** Анализ полученных данных показал, что при КПЭЭО ПКМ следует учитывать угол расположения форсунок промывки для увеличения производительности обработки глубоких глухих отверстий. Установлено, что наибольшее значение производительности достигается при расположении форсунок под углом 15˚. Преобладает ламинарное движение. При данном расположении форсунок значение давления жидкости и вывод шлама являются стабильными как при КПЭЭО ПКМ на глубину 2 мм, так и при обработке на глубину 15 мм. Отмечено, что для обработки отверстий глубиной 10 мм и более стоит учитывать угол наклона форсунки промывки, для эффективной обработки из зазора необходимо удалить эродированные частицы. В процессе проведения экспериментального исследования при обработке отверстий глубиной 15 мм наблюдались налипания шлама на электрод-инструмент, а также замыкание процесса КПЭЭО, возникновение вторичных разрядов в зоне обработки, что вызывало остановку процесса обработки.

Для цитирования: *Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Муратов К.Р.* Теоретическое моделирование процесса промывки межэлектродного пространства при копировально-прошивной электроэрозионной обработке изделий, выполненных из полимерных композитных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 25–38. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38.

Введение

Внедрение новых материалов, инновационных технологий и оборудования напрямую связано с развитием отраслей современного машиностроения, в том числе авиационной и нефтегазовой. Актуальна разработка и повышение эффективности технологий обработки новых

***Адрес для переписки**
Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел: 8 (342) 2-198-324, **e-mail:** Kruspert@mail.ruu

полимерных композитных материалов (ПКМ), а также формирование требуемых физико-механических свойств изделий, выполненных из данных материалов [1].

На сегодняшний день существует разнообразная номенклатура ПКМ, одними из которых являются новые перспективные материалы на основе углепластика, разработанные в ФГУП «ВИАМ». Одним из таких материалов является препрег углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Данный материал изготовлен на основе равнопрочной углеродной ткани ВТкУ-2.200 и связующего ВСЭ-1212. Для обработки изделий, выполненных из ПКМ, в том числе из углепластиков типа ВКУ-39, целесообразно применение электрофизических методов обработки. Одним из таких методов является копировально-прошивная электроэрозионная обработка (КПЭЭО). Применение таких методов обработки ПКМ обусловлено их высокими физико-механическими свойствами и сложностью обработки лезвийными методами. Ввиду того что одним из элементов ПКМ является связующее – эпоксидная смола, которая в процессе электроэрозионной обработки разрушается на кромках получаемых отверстий и пазов, ПКМ можно считать труднообрабатываемым материалом. Во время КПЭЭО отверстий в изделиях из ПКМ происходит повышение температуры, зачастую вызванное неэффективным охлаждением в зоне обработки [2–3].

В работах [4–6] представлены методы и особенности КПЭЭО ПКМ. На основе данных работ показано, что изделие из ПКМ при КПЭЭО подвергается воздействию электрических импульсов, в результате которого возникает плазменный канал, обладающий внутренней температурой порядка 9000…9500 °С, что приводит к смене состояния материала ПКМ. Происходит фазовый переход из твердого материала в парообразное вещество, что впоследствии приводит к тому, что пары ПКМ и расплавленные кусочки шлама электрода-инструмента (ЭИ) затвердевают при остывании и образуют продукты электроэрозионного шлама, негативно влияющего на качество и производительность КПЭЭО [7, 8].

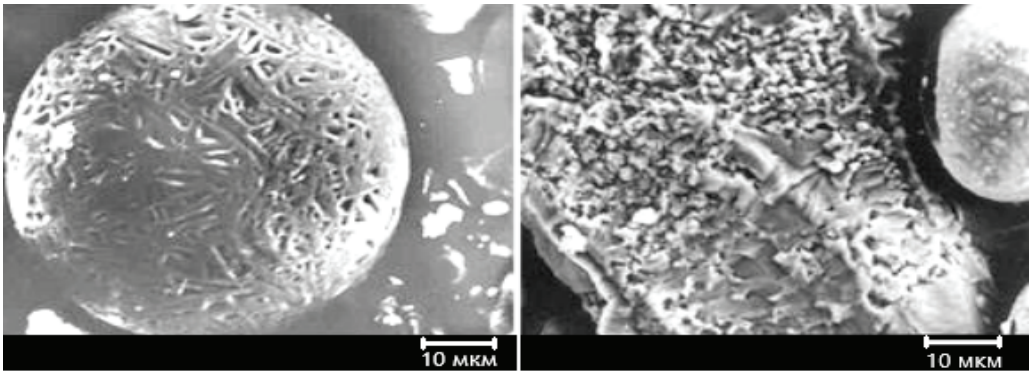
Скопление эрозионного шлама и других продуктов эрозии в зоне КПЭЭО изделий из ПКМ вызвано плохой промывкой пространства между ЭИ и обрабатываемой заготовкой при получении глубоких отверстий, а также шлицевых и шпоночных пазов. Данное явление приводит к возникновению вторичных дендритных структур на поверхности ЭИ и заготовки и, как следствие, снижению качества и производительности КПЭЭО изделий из ПКМ [7].

Установлено, что движение шлама во время КПЭЭО изделий из ПКМ напрямую обусловлено процессом образования и движения газовых пузырей в зоне обработки [8–11]. В связи с тем, что диэлектрик (как правило, минеральное или трансформаторное масло) является вязким, электроэрозионный шлам может перемещаться в оболочке газового пузыря. В результате исследований, проведенных в работах [8–11], становится возможным визуально показать процесс перемещения эрозионного шлама в межэлектродном пространстве. Предлагается варьировать параметрами высоты подъема ЭИ из зоны КПЭЭО, а также скоростью подъема данного ЭИ. Однако в данных работах отсутствуют практические рекомендации для увеличения производительности и эффективности КПЭЭО изделий из ПКМ.

Строение эрозионного шлама, полученного в результате разрушения ЭИ и материала заготовки, показано в работах [12, 13]. Электроэрозионный шлам, получаемый при КПЭЭО заготовки, образует сферические и полусферические частицы, показанные на рис. 1, *а*. В процессе остывания испаренного материала заготовки происходит непосредственное формирование формы частиц в виде сферы. Большая часть полученных сферических и полусферических частиц эрозионного шлама обладает дендритной структурой, что говорит о низких скоростях охлаждения процесса КПЭЭО. Образование эрозионного шлама из разрушенного ЭИ происходит путем термического выкрашивания (рис. 1, *б*).

Частицы электроэрозионного шлама подвержены разрушению. Можно наблюдать, как с увеличением значения энергии импульса на поверхности сферических частиц появляются трещины, вмятины, а также зоны выкрашивания и разрушения (рис. 2).

Локальный нагрев обрабатываемого материала вызывает термическое разложение боридной фазы и диэлектрической среды [14, 15]. Данная диэлектрическая среда обработки находится в состоянии движения и постоянной циркуляции, что приводит к охлаждению ЭИ и материала заготовки. Однако поток паров становится тур-



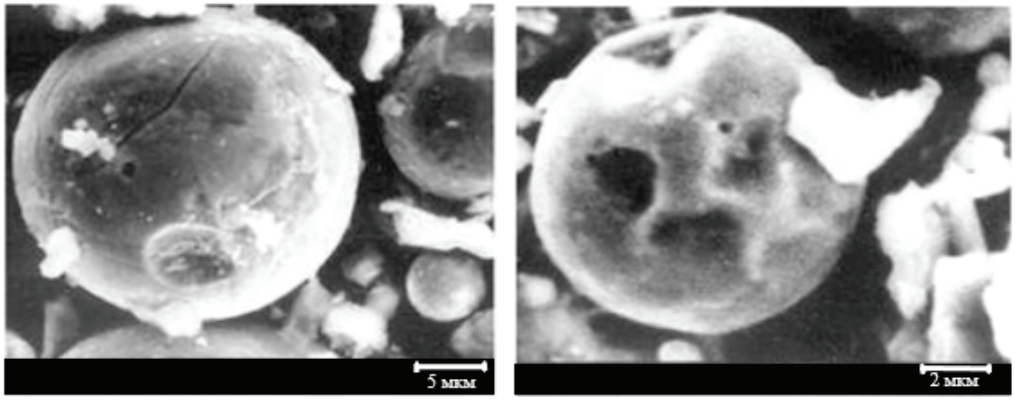
а *б*

Рис. 1. Электроэрозионный шлам:

а – с поверхности заготовки; *б* – с поверхности электрода-инструмента

Fig. 1. EDM sludge:

а – from the workpiece surface; *б* – from the surface of the electrode-tool



а *б*

Рис. 2. Поверхность частиц шлама сферической формы при разрушении:

а – при масштабе 5 мкм; *б* – при масштабе 2 мкм

Fig. 2. The surface of spherical sludge particles after destruction:

а – at a scale of 5 μm; *б* – at a scale of 2 μm

булентным и может распадаться на маленькие части–фракции, где каждая часть может конденсироваться в жидкость и, как следствие, в твердое состояние.

Капля жидкого металла, скорость охлаждения которой снижают пары рабочей жидкости, способствует сфероидизации и дендритной ликвации частиц. Снижение содержания рабочей жидкости и паров металла при низкой входящей энергии приводит к уменьшению количества частиц с меньшим средним размером. При невысоких значениях энергии импульса шлам быстрее затвердевает. При этом поток паров материала и рабочей жидкости увеличивается вместе со значениями входной импульсной энергии [14, 15]. Так как движение частиц шлама является турбулентным, то происходит их столкновение, в результате чего образуются трещины и вмятины на поверхности частиц данного шлама, а также возникает структура включений. Формирование электроэрозионного шлама существенным образом влияет на стабильность процесса КПЭЭО и, как следствие, производительность обработки.

Повышение производительности процесса КПЭЭО может быть достигнуто не только путем увеличения энергии импульсов, но и за счет интенсификации вывода продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Увеличение производительности происходит при эффективной промывке и способствует интенсивному удалению из зазора эродированных частицы ПКМ

и ЭИ. Промывка также приносит чистое трансмиссионное масло в зазор и охлаждает ЭИ и ПКМ. Чем глубже обработка, тем труднее обеспечить надлежащую промывку зоны обработки. Это, в свою очередь, увеличивает время обработки, что негативно сказывается на производительности. При определенных условиях обработки эродированные частицы наплавляются на изделие из ПКМ. Это приводит к неравномерности обработки и снижению производительности или вовсе к ее остановке.

Промывка широко используется при КПЭЭО глубоких отверстий, в том числе при КПЭЭЭ изделий из ПКМ. Недостаточная промывка снижает эффективность удаления материала, так как материал, который остается в отверстии, повторно расплавляется в последующем импульсе и наплавляется на поверхность электродов.

Интенсификация промывки при КПЭЭО способствует увеличению скорости съема материала, особенно в глубоких и узких полостях при КПЭЭО. В работах [16, 17] установлено, что промывка поддерживает скорость эвакуации материала после разряда. В работе [17] исследовался эффект скачка ЭИ, который используется для эвакуации эродированного материала при погружении под давлением. Скорость движения электрода влияла на распределение эродированных частиц, а амплитуда движения влияла на количество чистого диэлектрика.

В работе [18] показано падение давления диэлектрической жидкости на глубине отверстия и влияние глубины отверстия на падение давления. Это была потеря 15 % длины из наблюдаемых 25 мм. Установлена также более высокая концентрация эродированного материала в углу обработанного отверстия (рис. 3).

Струйная или боковая промывка осуществляется трубками или промывочными соплами, которые направляют диэлектрическую жидкость в зазор, как показано на рис. 4.

Эффективность промывки при КПЭЭО глубоких отверстий в ПКМ при сложной геометрии каналов промывки электродов практически не исследована в полной мере. Существующие модели при обработке КПЭЭО ПКМ могут быть получены с помощью теоретического моделирования в программных системах конечно-элементного анализа, в том числе Ansys.

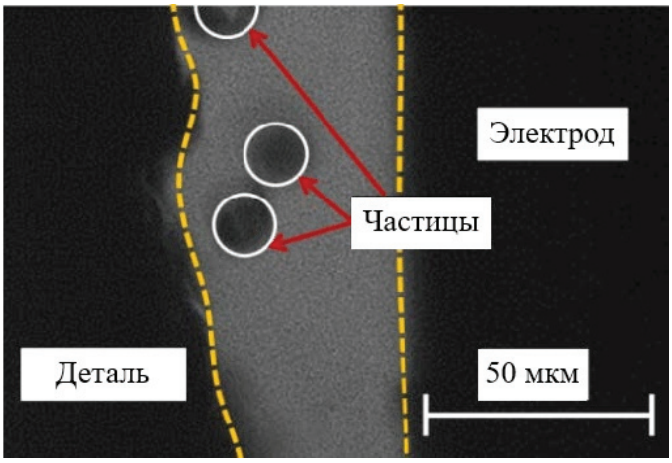


Рис. 3. Частичная трассировка в зазоре между электродом и заготовкой. Среднее значение скорости частиц составляет приблизительно 0,75 м/с

Fig.3. Partial tracing in the gap between the electrode and the workpiece. The average particle velocity is approximately 0.75 m/s

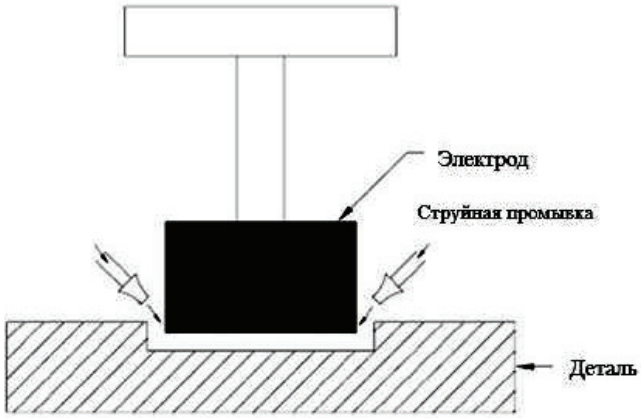


Рис.4. Схема струйной или боковой промывки

Fig.4. Scheme of jet or side flushing

Актуальной задачей является получение теоретической модели, позволяющей оценить влияние способа промывки на эффективность КПЭЭО изделий из ПКМ на основе численного моделирования в программных системах конечно-элементного анализа.

Цель работы: повышение производительности процесса КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ.

Задачи

1. Провести теоретический анализ влияния промывки форсунок рабочей жидкости на процесс КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ.

2. Провести экспериментальное исследование производительности процесса КПЭЭО изде-

лий, выполненных из ПКМ, и верификацию теоретической модели производительности КПЭЭО изделий, выполненных из ПКМ.

Методика исследований

Экспериментальные исследования проведены по методике, описанной в работах [4, 5, 19]. Для проведения экспериментов выбран ЭИ из меди М1 ГОСТ 859–2001. Заготовка выполнена из ПКМ марки ВКУ-39. Заготовка подвергалась обработке на копировально-прошивном электроэрозионном станке Smart CNC при постоянном напряжении U = 50 В, времени включения импульса T_{on} =100 мкс и силе тока: I = 10 А [4, 5, 19].

Для теоретического моделирования потока использовалось программное обеспечение ANSYS CFX 20.1. Для вычисления основных направлений потока и распределения скорости в межэлектродном зазоре выбрано трансформаторное масло (Engineer oil). Температура масла задана стандартная, равная 25°. Для всех случаев давление равно 2,1 кг/см^2 = 0,205 МПа. Моделирование распределения потоков проводилось при трех значениях глубины обработки (2, 10, 15 мм), а также при трех значениях угла наклона форсунок (15, 45,75°), см. рис. 2–4.

Целью моделирования является получение теоретической модели распределения потоков рабочей жидкости в зоне обработки при условии изменения угла подачи промывки. Для достижения заданной в работе цели необходимо: построить геометрию расчетной области, задать граничные условия расчетной модели, произвести расчет модели для глубины обработки 2, 10, 15 мм и расположением форсунок 15°, 45° и 75° относительно оси инструмента (рис. 5).

Как показала экспериментальная часть, проведенная в работах [4–6], изделия из ПКМ в процессе КПЭЭО склонны к наплавлению шлама на обработанную поверхность. Это связано с нерациональным расположением форсунок промывки и образованием завихрений в зоне обработки.

Моделирование выполняется после задания имен граничных поверхностей: стенок детали, ЭИ и форсунок промывки. Для обработки 10 и 15 мм ограничения геометрии схожи, однако меняется только угол расположения форсунок (рис. 6).

С целью задания условий для форсунок промывки в каталоге Ansys CFXPRE выбрана рабочая жидкость – трансформаторное масло (Engineer oil). Температура масла задана стандартная, равная 25°.

На рис. 7 представлена расчетная сетка. Для построения сетки задаем минимальное и максимальное значение единичного воксела: min – 1 мм, max – 5 мм. Идентично делаем и для остальных расчетных случаев. При моделировании принято, что форсунки будут работать

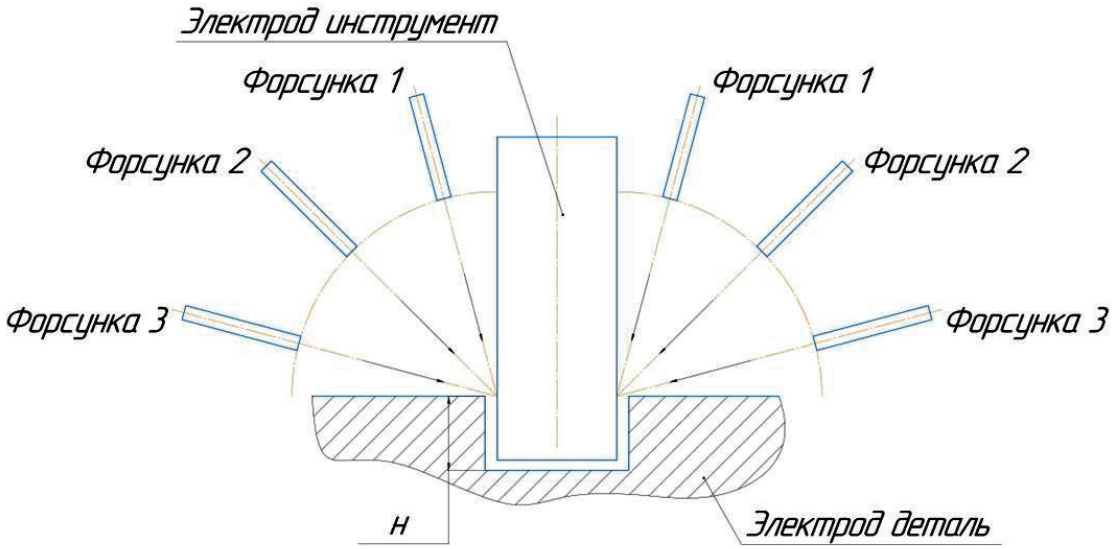


Рис. 5. Модель обработки, где *H* – глубина обработки

Fig. 5. Processing model, where *H* is the depth of processing

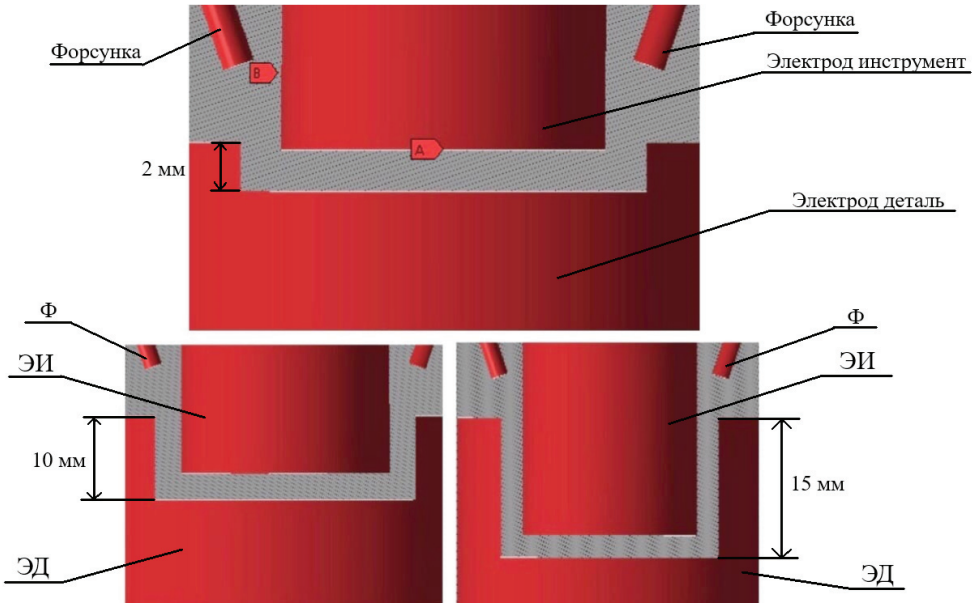


Рис. 6. Задание геометрических ограничений

Fig. 6. Processing model, where H is the depth of processing

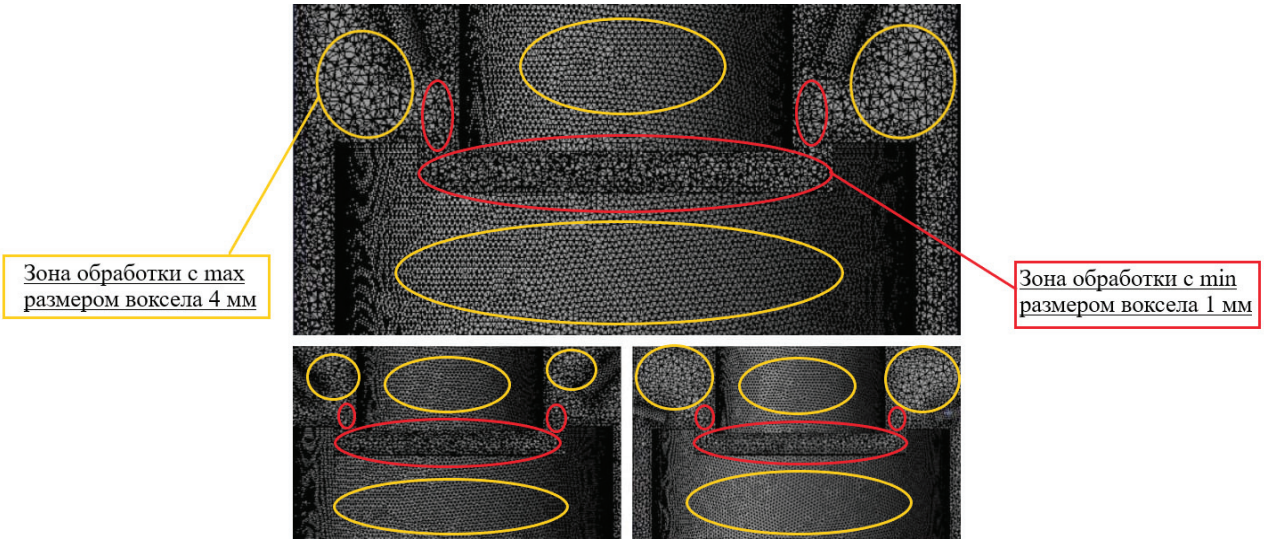


Рис. 7. Модель сетки для расчета

Fig. 7. Mesh model for calculation

с одинаковым давлением и углом расположения относительно оси инструмента. Для всех случаев давление идентично и равно 2,1 кг/см^2 = = 0,205 МПа.

Показано, что в области обработки и в граничных областях сетка приняла минимальные значения, что увеличит точность моделирования. Однофазный поток рабочей жидкости масла моделируется с использованием стандартной модели турбулентности (рис. 8).

Геометрические данные потока масла собираются с помощью увеличенного изображения поперечного сечения электрода и упрощаются для уменьшения времени вычислений. Количество элементов тетраэдрической сетки варьируется от 7,8 до 6,4 млн элементов в отверстии заготовки соответственно геометрии объемного потока из-за небольших геометрических особенностей внутри зоны обработки. Расчеты проводятся в модуле Ansys Fluid Flow.

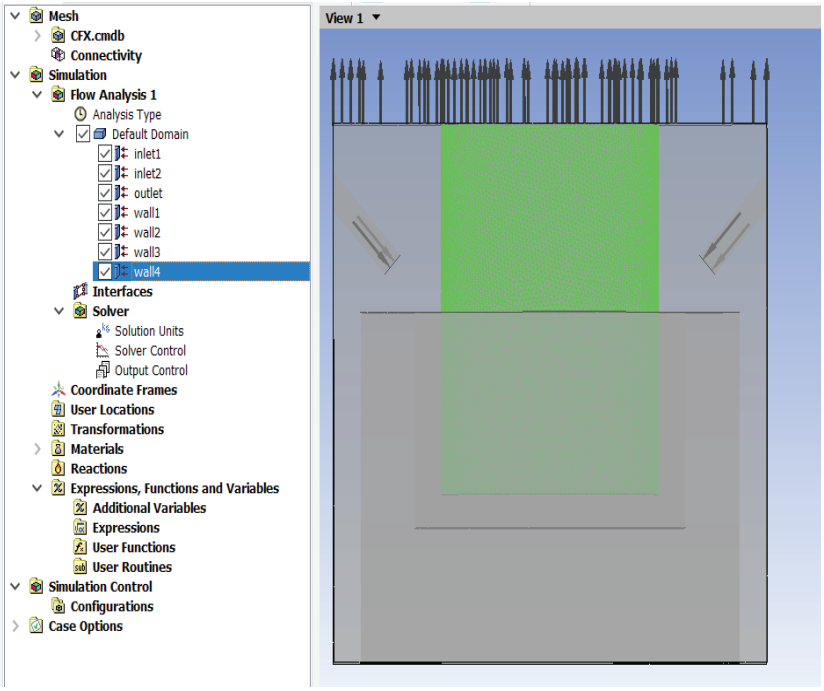


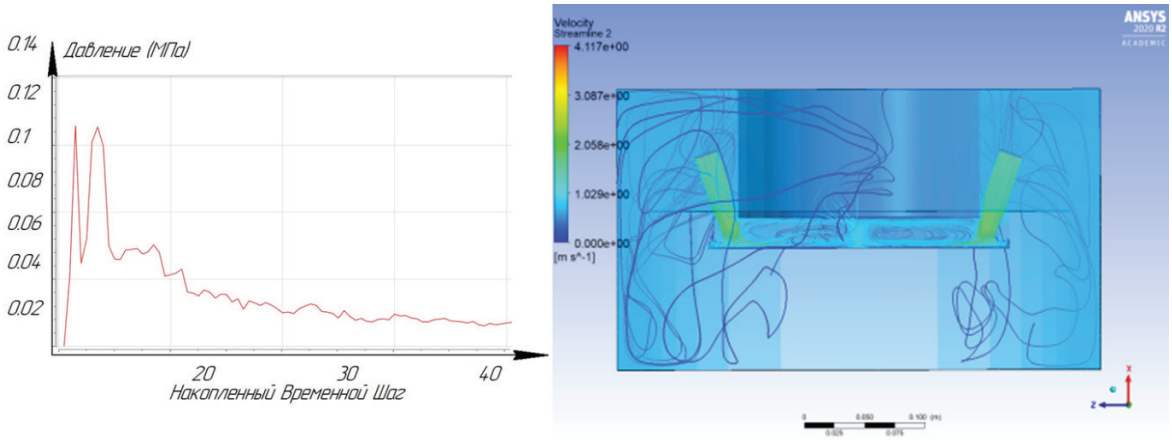
Рис. 8. Дерево построения расчета с конечной моделью модуля *CFXPRE*

Fig. 8. Calculation construction tree with the final model of the *CFXPRE* module

Результаты их обсуждение

На основе полученных данных установлено, что при обработке образца из ПКМ на глубину 2 мм влияние угла расположения форсунок на эффективность промывки не является существенным. На рис. 9–11 показано, что преобладает ламинарное течение жидкости.

При глубине обработки 10 мм установлено, что для форсунки, расположенной под углом 15°, преобладает ламинарное движение рабочей жидкости. Турбулентность образуется в зоне обработки, где сталкиваются потоки двух форсунок. Отмечено, что для форсунок, расположенных под углами 45 и 75°, турбулентность образуется в межэлектродном зазоре и влечет



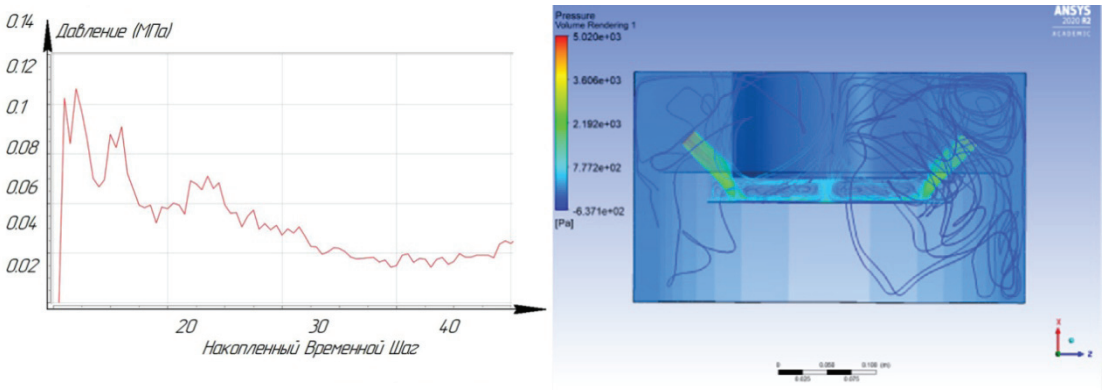
а *б*

Рис. 9. Глубина 2 мм, угол расположения форсунок 15°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 9. Depth 2 mm, nozzle angle 15°:

а – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



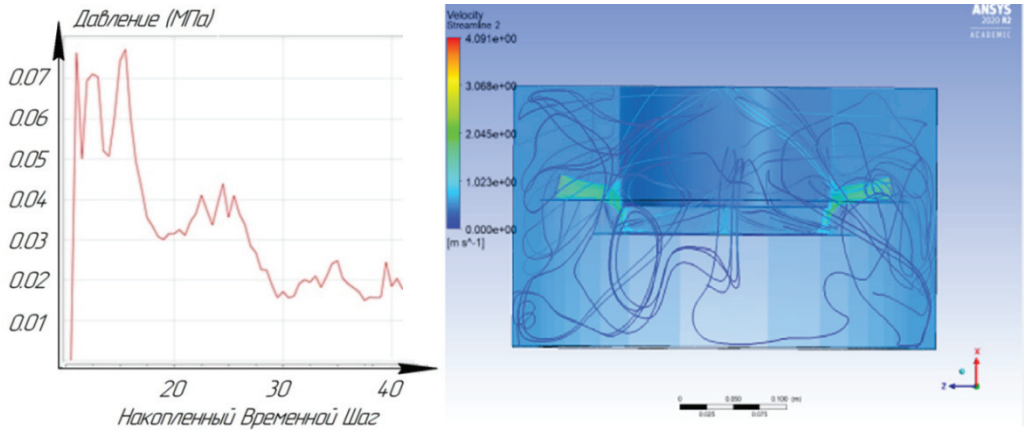
а *б*

Рис. 10. Глубина 2 мм, угол расположения форсунок 45°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 10. Depth 2 mm, nozzle angle 45°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



а *б*

Рис. 11. Глубина 2 мм, угол расположения форсунок 75°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 11. Depth 2 mm, nozzle angle 75°:

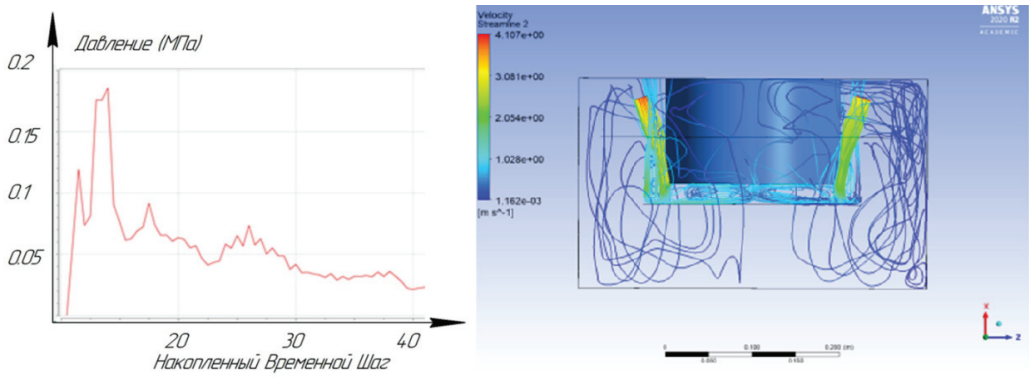
a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models

за собой незначительное снижение давления. Вывод шлама из зоны обработки затруднен (рис. 12–14).

На рис. 15–17 показано, что при глубине обработки 15 мм для форсунки, расположенной под углом 15°, ламинарное движение резко переходит в турбулентное. В зоне обработки, где сталкиваются потоки двух форсунок, полностью преобладает турбулентное движение. Установлено, что при обработке отверстий данной глубины и выше расположение форсунок под углом 45 и 75° относительно оси инструмента нецелесообразно в связи с высокой турбулентностью потока и потерей давления трансформаторного масла в зоне обработки (рис. 15–17).

Из представленных рисунков можно сделать вывод, что при расположении форсунок под углом 45 и 75° преобладает турбулентное движение, которое влечет за собой снижение давления. Значение давления для форсунки в 75°не превысило 0,07 МПа, в то время как форсунка в 15° обеспечила рациональное давление в зоне обработки от 0,1 до 0,2 МПа.

Показано, что расположение форсунки под углом 75° для обработки отверстий глубже 10 мм уменьшает давление в зоне обработки в два раза.



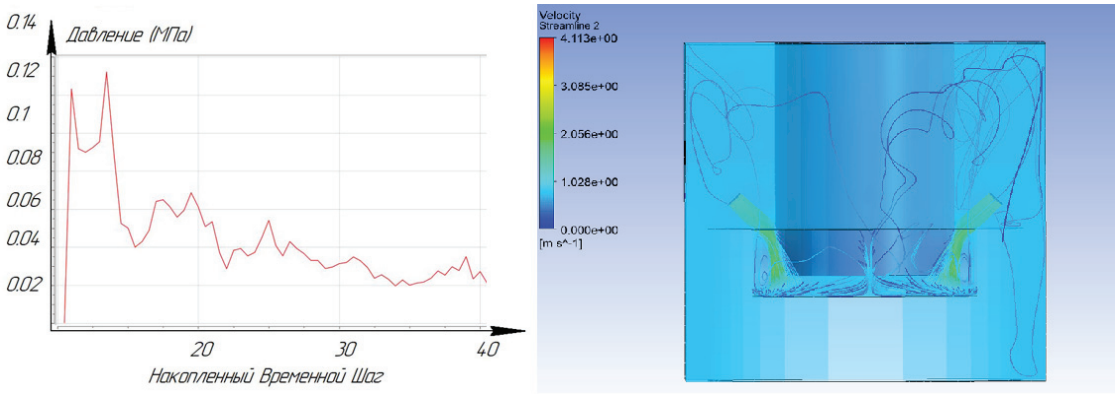
а *б*

Рис. 12. Глубина 10 мм, угол расположения форсунок 15°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 12. Depth 10 mm, nozzle angle 15°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



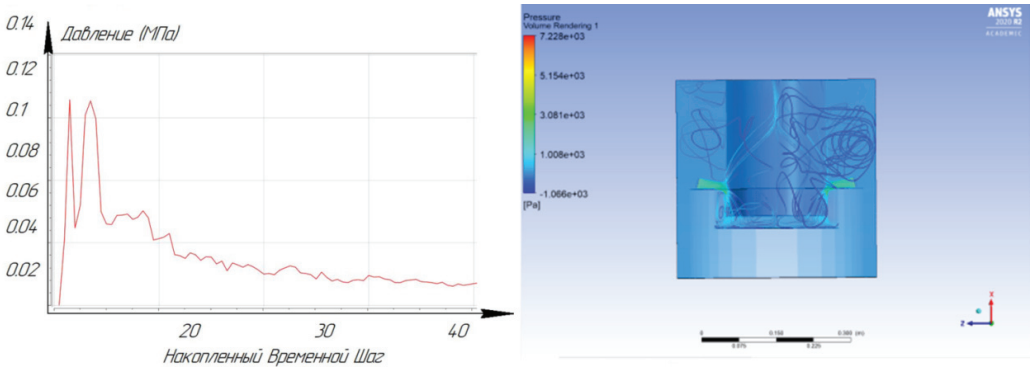
а *б*

Рис. 13. Глубина 10 мм, угол расположения форсунок 45°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 13. Depth 10 mm, nozzle angle 45°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



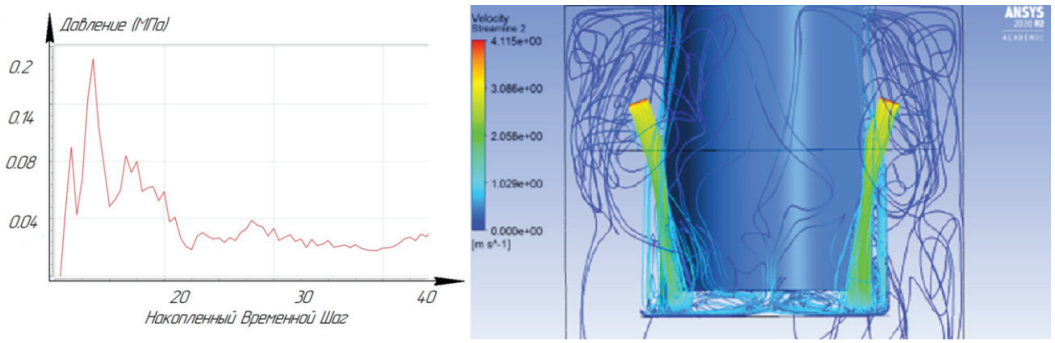
а *б*

Рис. 14. Глубина 10 мм, угол расположения форсунок 75°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 14. Depth 10 mm, nozzle angle 75°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



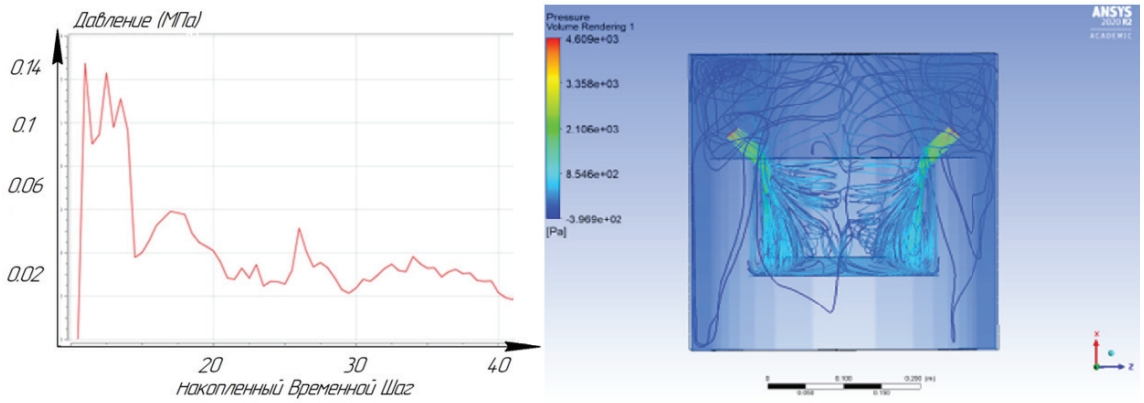
а *б*

Рис. 15. Глубина 15 мм, угол расположения форсунок 15°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 15. Depth 15 mm, nozzle angle 15°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



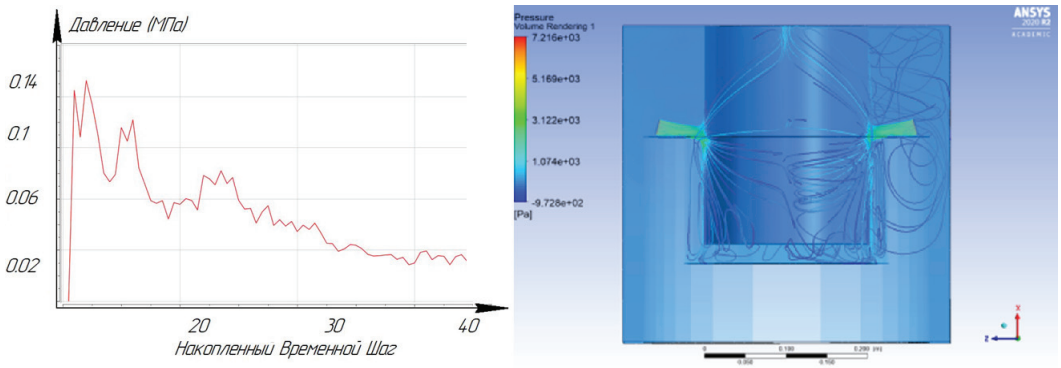
а *б*

Рис. 16. Глубина 15 мм, угол расположения форсунок 45°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 16. Depth 15 mm, nozzle angle 45°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models



а *б*

Рис. 17. Глубина 15 мм, угол расположения форсунок 75°:

а – расчет давления рабочей жидкости; *б* – модели распределения потоков

Fig. 17. Depth 15 mm, nozzle angle 75°:

a – calculation of the pressure of the working fluid; *б* – flow distribution models

Для обработки отверстий глубже 15 мм расположение форсунок под углом 75° критически влияет на давление, скорость рабочей жидкости и эвакуации эродированных частиц из зоны обработки, что негативно сказывается на производительности.

Для уточнения теоретического моделирования проведены экспериментальные исследования по измерению производительности КПЭЭО изделий из ПКМ (рис. 18).

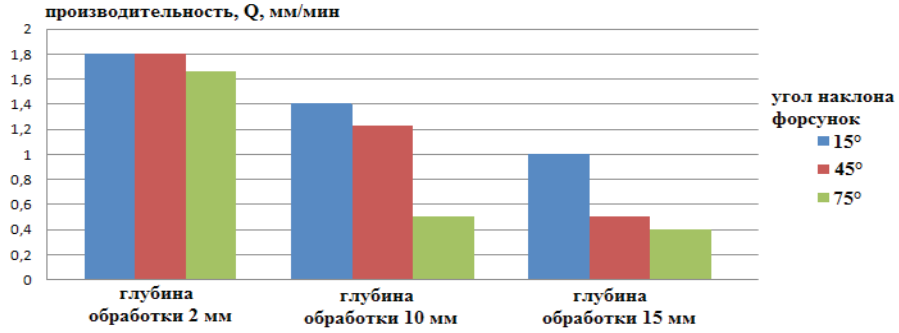


Рис. 18. Значения величины производительности

Fig. 18. Performance values

Показано, что при обработке отверстий глубиной 2 мм значение угла наклона форсунки промывки не влияет на производительность ЭЭО.

Эффект влияния угла наклона форсунок проявляется при КПЭЭО на глубину 10 и 15 мм. Наблюдается снижение величины значения производительности процесса КПЭЭО в связи с затруднением промывки межэлектродного пространства от шлама. Отмечено, что для обработки отверстий глубиной 10 мм и более стоит учитывать угол наклона форсунки промывки, а для эффективной обработки из зазора необходимо удалить эродированные частицы. В процессе проведения экспериментального исследования при обработке отверстий глубиной 15 мм наблюдались налипания шлама на ЭИ, а также замыкание процесса КПЭЭО, возникновение вторичных разрядов в зоне обработки, что вызывало остановку процесса обработки. Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты теоретического моделирования.

Выводы

1. Получена теоретическая модель, описывающая процесс промывки зоны КПЭЭО для различной глубины обработки и расположения форсунок подачи рабочей жидкости.

2. Установлено, что при глубине обработки 2 мм расположение форсунок не влияет на качество промывки и производительность КПЭЭО ПКМ ВКУ-39. Преобладает ламинарное течение жидкости.

3. Показано, что при КПЭЭО ПКМ ВКУ-39 на глубину 10 и 15 мм расположение форсунок влияет на качество промывки и производительность КПЭЭО ПКМ ВКУ-39. Наибольшее значение производительности достигается при расположении форсунок под углом 15˚. Для обработки отверстий глубиной 10 мм и более стоит учитывать угол наклона форсунки промывки. Для эффективной обработки из зоны обработки необходимо удалять эродированные частицы. При обработке под углом 45 и 75° возникает турбулентое течение жидкости, а также вероятность вторичных разрядов. Экспериментально подтверждено налипание шлама на поверхности ЭИ и возникновение замыкания и, как следствие, нестабильности процесса КПЭЭО изделий из ПКМ ВКУ-39. Для обработки отверстий глубиной 15 мм расположение форсунок под углом 75° критически влияет на давление, скорость рабочей жидкости и эвакуацию эродированных частиц из зоны обработки, что негативно сказывается на производительности.

4. Проведенные экспериментальные исследования показывают работоспособность полученной теоретической модели. Установлено, что при обработке глухих отверстий глубиной порядка 15 мм необходимо устанавливать угол форсунки на величину 15°. При данном расположении форсунок значение давления жидкости и вывод шлама являются стабильными, обеспечивается наибольшая производительность при КПЭЭО глубоких отверстий в изделиях, выполненных из ПКМ ВКУ-39.

Список литературы

1. *Sarde B., Patil Y.D.* Recent research status on polymer composite used in concrete – An overview // Materials Today Proceedings. – 2019. – Vol. 18. – P. 3780–3790. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.316.

2. Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites / R. Yahaya, S.M. Sapuan, M. Jawaid, Z. Leman, E.S. Zainudin // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2014. – Vol. 33 (24). – P. 2242–2254. – DOI: 10.1177/0731684414559864.

3. *Thomason J.* A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings // Polymer Testing. – 2020. – Vol. 85. – P. 106421. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.

4. *Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Oglezneva S.A.* Electrical discharge machining of polymer composites // *Russian Engineering Research.* – 2020. – Vol. 40. – P. 878–879. – DOI: 10.3103/S1068798X20100275.

5. Electric-discharge machining of polymer composites / T.R. Ablyaz, K.R. Muratov, E.S. Shlykov, G.S. Shipunov, T.V. Shakirzyanov // *Russian Engineering Research*. – 2019. – Vol. 39. – P. 898–900. – DOI: 10.3103/S1068798X19100058.

6. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials / T.R. Ablyaz, E.S. Shlykov, K.R. Muratov, S.S. Sidhu // Micromachines. – 2021. – Vol. 12 (5). – P. 571. – DOI: 10.3390/mi12050571.

7. *Yilmaz O., Okka M.A.* Effect of single and multichannel electrodes application on EDM fast hole drilling performance // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 51. – P. 185–194. – DOI: 10.1007/s00170-010-2625-3.

8. *Bozdana A.T., Ulutas T.* The effectiveness of multichannel electrodes on drilling blind holes on Inconel 718 by EDM process // Materials and Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 31. – P. 504–513. – DOI: 10.1080/10426914.2015.1059451.

9. *Haas P., Pontelandolfo P., Perez R.* Particle hydrodynamics of the electrical discharge machining process. Pt. 1: Physical considerations and wire EDM process improvement // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6. P. 41–46. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.006.

10. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf / A. Okada, Y. Uno, S. Onoda, S. Habib // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 58. – P. 209–212. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.003.

11. *Takino H., Han F.* Cutting of polished single-crystal silicon by wire electrical discharge machining using anti-electrolysis pulse generator // Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology. – Dubrovnik, Croatia, 2014. – Vol. 2. – P. 59–62.

12. *Wang J., Han F.* Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 77. – P. 56–65. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.007

13. *Schumacher B.M.* About the role of debris in the gap during electrical discharge machining // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1990. – Vol. 39. – P. 197–199. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61034-8.

14. *Su J.C., Kao J.Y., Tang Y.S.* Optimisation of the electrical discharge machining process using a GA-based neural network // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 24. – P. 81–90. – DOI: 10.1007/s00170-003-1729-4.

15. Investigation of the scaling effects in meso-micro EDM / U. Maradia, K. Wegener, J. Stirnimann, R. Knaak, M. Boccadoro // ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – San Diego, 2013. – Vol. 2B. – P. 63160. – DOI: 10.1115/IMECE2013-63160.

16. A new electrode sidewall insulation method in electrochemical drilling / J. Wang, W. Chen, F. Gao, F. Han // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 75. – P. 21–32. – DOI: 10.1007/s00170-014-6131-x.

17. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow field in discharge gap of high-speed small hole EDM drilling / Y.Q. Wang, M.R. Cao, S.Q. Yang, W.H. Li // Advanced Materials Research. – 2008. – Vol. 53–54. – P. 409–414. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.409.

18. *Kliuev M., Baumgart C., Wegener K.* Fluid dynamics in electrode flushing channel and electrode-workpiece gap during EDM drilling // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 68. – P. 254–259. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.058.

19. *Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R.* Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 6105. – DOI: 10.3390/ma14206105.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 25–38
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Theoretical simulation of the process interelectrode space flushing during copy-piercing EDM of products made of polymer composite materials

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

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

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

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 31 March 2022
Revised: 06 April 2022
Accepted: 12 April 2022
Available online: 15 June 2022

Keywords:
Polymer composite materials
Copy-piercing electrical discharge machining
Flushing
Sludge

Funding
The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of sciences No. MK-566.2021.4.

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

ABSTRACT

Introduction. Polymer composite materials (*PCM*) are used to improve the mechanical properties and increase the working period of products. For the processing of products made of *PCM*, the use of electrophysical processing methods is standard. One of these methods is copy-piercing electrical discharge machining (*EDM*). The use of such methods for processing *PCM* is due to its high physical and mechanical characteristics and the complexity of processing by blade methods. Considering the fact that the *PCM* element is a binder – epoxy resin, which is destroyed at the edges of the resulting holes and grooves during *EDM*, *PCM* can be considered difficult to process. During the *EDM* of holes in *PCM* products, the temperature rises, and inefficient cooling often occurs in the processing zone. The paper is devoted to theoretical simulation in the *Ansys* package, which makes it possible to evaluate the impact of flushing method on the efficiency of the *EDM* of *PCM* products based on numerical simulation in finite element analysis software systems. The aim of the work is to increase the productivity of the processes of *EDM* for *PCM* products. **Methods.** Experimental studies were carried out according to the method of a classical experiment on a copy-piercing electrical discharge *Smart CNC* machine. The workpiece was processed at a constant voltage $U = 50$ V, pulse on-time $T_{on} = 100$ µs and current: $I = 10$ A. For theoretical simulation of the flow, the *ANSYS CFX 20.1* software was used. Flow distribution simulation was carried out at three processing depths (2, 10, 15 mm), as well as at three nozzle inclination angles (15, 45, 75°). **Results And Discussion.** The analysis of the data obtained showed that in the case of the *EDM* of *PCM*, the angle of the location of the flushing nozzles should be taken into account in order to increase the productivity of processing deep, blind holes. It is established that the highest performance value is achieved when the nozzles are located at an angle of 15˚. The laminar motion prevails. With this arrangement of the nozzles, the value of the liquid pressure and the removal of the sludge are stable both with the *EDM* of *PCM* to a depth of 2 mm, and when processing to a depth of 15 mm. It is noted that for processing holes with a depth of 10 mm or more, it is worth considering the angle of inclination of the flushing nozzle for effective processing, it is necessary to remove eroded particles from the gap. In the process of conducting an experimental study, when processing holes with a depth of 15 mm, sticking of sludge to the electrode-tool was observed, as well as the closure of the *EDM* process, the occurrence of secondary discharges in the processing zone, which caused the processing to stop.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Theoretical simulation of the process interelectrode space flushing during copy-piercing EDM of products made of polymer composite materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 25–38. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38. (In Russian).

References

1. Sarde B., Patil Y.D. Recent research status on polymer composite used in concrete – An overview. *Materials Today Proceedings*, 2019, vol. 18, pp. 3780–3790. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.316.

2. Yahaya R., Sapuan S.M., Jawaid M., Leman Z., Zainudin E.S. Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, vol. 33 (24), pp. 2242–2254. DOI: 10.1177/0731684414559864.

*** Corresponding author**
Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolsky prospect
614990, Perm, Russian Federation
Tel.: 8 (342) 2-198-324, **e-mail:** Kruspert@mail.ru

3. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings. *Polymer Testing*, 2020, vol. 85, p. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.

4. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Oglezneva S.A. Electrical discharge machining of polymer composites. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, pp. 878–879. DOI: 10.3103/S1068798X20100275.

5. Ablyaz T.R., Muratov K.R., Shlykov E.S., Shipunov G.S., Shakirzyanov T.V. Electric-discharge machining of polymer composites. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, pp. 898–900. DOI: 10.3103/S1068798X19100058.

6. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials. *Micromachines*, 2021, vol. 12 (5), p. 571. DOI: 10.3390/mi12050571.

7. Yilmaz O., Okka M.A. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 51, pp. 185–194. DOI: 10.1007/s00170-010-2625-3.

8. Bozdana A.T., Ulutas T. The effectiveness of multichannel electrodes on drilling blind holes on Inconel 718 by EDM process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, pp. 504–513. DOI: 10.1080/10426914.2015.1059451.

9. Haas P., Pontelandolfo P., Perez R. Particle hydrodynamics of the electrical discharge machining process. Pt. 1: Physical considerations and wire EDM process improvement. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.006.

10. Okada A., Uno Y., Onoda S., Habib S. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, pp. 209–212. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.003.

11. Takino H., Han F. Cutting of polished single-crystal silicon by wire electrical discharge machining using anti-electrolysis pulse generator. *Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, Dubrovnik, Croatia, 2014, vol. 2, pp. 59–62.

12. Wang J., Han F. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, vol. 77, pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.007.

13. Schumacher B.M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1990, vol. 39, pp. 197–199. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61034-8.

14. Su J.C., Kao J.Y., Tang Y.S. Optimisation of the electrical discharge machining process using a GA-based neural network. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 24, pp. 81–90. DOI: 10.1007/s00170-003-1729-4.

15. Maradia U., Wegener K., Stirnimann J., Knaak R., Boccadoro M. Investigation of the scaling effects in meso-micro EDM. *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Diego, 2013, vol. 2B, p. 63160. DOI: 10.1115/IMECE2013-63160.

16. Wang J., Chen W., Gao F., Han F. A new electrode sidewall insulation method in electrochemical drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 21–32. DOI: 10.1007/s00170-014-6131-x.

17. Wang Y.Q., Cao M.R., Yang S.Q., Li W.H. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow field in discharge gap of high-speed small hole EDM drilling. *Advanced Materials Research*, 2008, vol. 53–54, pp. 409–414. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.409.

18. Kliuev M., Baumgart C., Wegener K. Fluid dynamics in electrode flushing channel and electrode-workpiece gap during EDM drilling. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, pp. 254–259. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.058.

19. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 6105. DOI: 10.3390/ma14206105.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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). 2022 Том 24 № 2 с. 39–49
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Деформации в нестационарной стадии прессования прутка из алюминиевого сплава с малым коэффициентом вытяжки

Юрий Логинов [1, 2, a,*], *Георгий Шимов* [1, b], *Наталья Бушуева* [1, c]

[1] Уральский Федеральный университет, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия
[2] Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-7222-2521, j.n.loginov@urfu.ru, [b] http://orcid.org/0000-0001-5763-0837, g.v.shimov@urfu.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-0603-8785, m0rgondagen@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.777.01

История статьи:
Поступила: 21 марта 2022
Рецензирование: 21 апреля 2022
Принята к печати: 29 апреля 2022
Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:
Прессование
Алюминиевый сплав
Метод конечных элементов
Пластическая деформация
Обработка металлов давлением

Финансирование:
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение 22-29-00931 от 20.12.2021.

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечено, что прессование является основным заготовительным процессом в обработке давлением алюминиевых сплавов. При этом сам процесс обладает таким недостатком, как нестационарность пластического течения металла. **Целью работы** является установление уровня деформационной неоднородности передней части отпрессованного прутка путем численного моделирования с применением метода конечных элементов. Задачами исследования являются формулировка граничных условий процесса прессования, получение решения и оценка степени неоднородности. **Методы исследования:** для оценки деформированного состояния применили метод конечных элементов. Последовательность действий включала создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента. Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – пластический материал со степенным упрочнением, физико-механические свойства соответствуют алюминиевому сплаву серии 6000. **Результаты и обсуждение**. Выявлено, что степень деформации в передней части отпрессованного изделия распределена крайне неравномерно, различия зафиксированы выше 300 %. Построены зависимости распределения степени деформации в поперечных сечениях прутка в зависимости от расстояния от переднего торца при различных относительных радиальных координатах. Выявлено, что центральные слои прутка приобретают постоянный уровень степени деформации раньше, чем периферийные слои, т. е. для них стационарность процесса достигается при меньшем перемещении металла. **Областью применения результатов** работы является технологическая проработка рационального раскроя металла на финишной стадии прессового передела алюминиевых сплавов с целью более рационального использования возвратных отходов. **Выводы.** В процессе прессования с малым коэффициентом вытяжки степень деформации распределяется неравномерно как по поперечному сечению пресс-изделия, так и по его длине. В нестационарной начальной стадии прессования передняя часть прутка остается слабо деформированной как на периферии, так и в центре, что часто вынуждает отправлять ее на переплав вследствие недостаточно проработанной структуры металла. В то же время, если установить ограничения на минимально возможную степень деформации, то по результатам расчета методом конечных элементов можно установить минимальную длину удаляемого металла, за счет чего удастся снизить массу отходов, направляемых в переплав.

Для цитирования: *Логинов Ю.Н., Шимов Г.В., Бушуева Н.И.* Деформации в нестационарной стадии прессования прутка из алюминиевого сплава с малым коэффициентом вытяжки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 39–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49.

Введение

Наряду с горячей листовой прокаткой прессование является одним из основных заготовительных видов обработки в производстве полуфабрикатов из алюминия и его сплавов [1, 2]. Сам процесс отличается повышенной гибкостью: для перехода на выпуск другого вида изделия часто достаточно применить смену матрицы. Такой быстроты не удастся достичь при использовании процесса прокатки, где придется менять целые комплекты валков. Дополнительно именно в случае обработки алюминиевых сплавов, в отличие, например, от обработки меди или стали, становится возможным вести процесс деформации при умеренных температу-

***Адрес для переписки**
Логинов Юрий Николаевич, д.т.н., профессор
Уральский Федеральный университет,
ул. Мира, 19,
620002, г. Екатеринбург, Россия
Тел.: 8 (343) 375-44-37, **e-mail:** j.n.loginov@urfu.ru

рах. В результате инструментальная оснастка сохраняет прочностные свойства, даже если ее нагреть до температуры деформации. Это выводит процесс на уровень изотермической обработки, что должно стабилизировать свойства конечного продукта.

Вместе с тем прессование отличается повышенными отходами металла в виде отрезанных передней и задней частей отпрессованного профиля. Они отбраковываются по причине иного деформированного состояния, чем основная часть изделия [3]. Например, для задней части отпрессованного профиля характерно образование пресс-утяжины, в результате чего появляется дефектность изделия [4, 5].

Для передней части профиля характерен малый уровень пластической деформации, что приводит к не проработке литой структуры металла. В результате механические свойства оказываются в этом месте невелики и часто не соответствуют требованиям стандарта. Кроме того, стандартами, особенно на продукцию из алюминиевых сплавов авиационного назначения, диктуются требования по структурному состоянию металла, которые также могут оказаться не выполнены. Неравномерность структуры и свойств прессованных полуфабрикатов по длине и по поперечному сечению является предметом изучения технологических служб предприятий и исследовательских учреждений [6, 7].

Поведение передней части прессуемого изделия происходит в условиях осуществления малых пластических деформаций. Если при этом запланировано прессование с заранее уменьшенными коэффициентами вытяжки, то эффект от двух этих явлений суммируется и приходится принимать во внимание их последствия. Сам процесс прессования с малыми коэффициентами вытяжек анализировался, например, авторами [8] для случая прессования алюминиевого сплава. При этом обсуждалась проблема возможного снижения коэффициентов вытяжек за счет применения слитков меньших поперечных сечений. Поскольку при этом снижается уровень пластической деформации, то уменьшаются и энергетические затраты. Однако при этом остается актуальным вопрос доведения пластической деформации до таких величин, чтобы необходимые свойства продукта были получены. Отсюда возникает проблема достижения оптимальной величины деформации, которая устроила бы и экономику процесса со стороны минимизации энергетических затрат, и получение продукции необходимого качества. В результате даже начали появляться технические решения, направленные на искусственное увеличение степени деформации при прессовании, по крайней мере, магниевых сплавов [9].

Другая причина неудовлетворительных свойств передних частей пресс-изделий состоит в возможности их растрескивания после выхода из отверстия матрицы. Дело в том, что напряженное состояние металла, находящегося вблизи матрицы, отличается от состояния металла, находящегося в контейнере пресса. В последнем случае окажется напряженное состояние всестороннего сжатия [10], повышающее пластичность металла. Однако металл напротив отверстия матрицы имеет свободную поверхность и на него не действуют напряжения подпора. Поскольку пластичность металла является функцией напряженного состояния, то при отсутствии напряжений сжатия пластичность оказывается пониженной, и для недостаточно пластичных сплавов алюминия возможно появление трещин именно на передней части выходящего из матрицы пресс-изделия, что показано в работе [11] на примере производства крупногабаритных труб. При переходе в стационарную стадию прессования эффект отсутствия переднего подпора пропадает, и изделие перестает разрушаться.

Поэтому определение деформированного состояния передней выходной части прессованного изделия, особенно в условиях деформации с малыми коэффициентами вытяжек, является актуальной задачей.

Для анализа напряженно-деформированного состояния при прессовании может применяться физическое моделирование [12], но в последнее время чаще всего используют метод конечных элементов, реализованный в различных программных продуктах: QFORM [13,14], FORGE [15], DEFORM [16-18], РАПИД [19] и др. Это позволяет оценить ситуацию в каждой элементарной точке деформируемого металла. При этом возможно учесть все многообразие свойств деформируемых материалов и граничных условий в производственных ситуациях.

Целью работы является установление уровня деформационной неоднородности передней

части отпрессованного прутка путем численного моделирования с применением метода конечных элементов.

Методики исследования

Процесс прямого прессования осуществляется продавливанием металла слитка *1*, расположенного в контейнере пресса *2*, усилием пуансона *3* через отверстие матрицы *4* (рис. 1). В результате на выходе матрицы вначале появляется передняя часть прутка *5*, затем наступает стационарная стадия процесса и выдавливается весь слиток за исключением пресс-остатка.

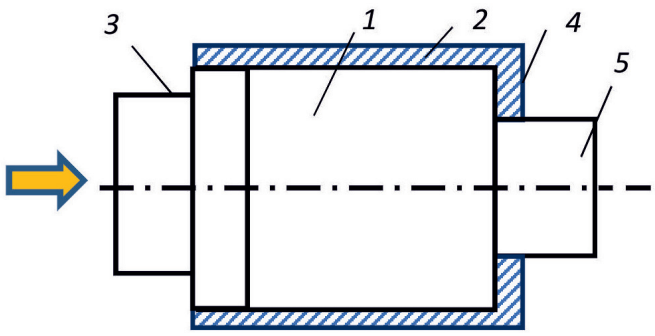


Рис. 1. Схема прямого прессования:

1 – слиток; *2* – контейнер; *3* – пуансон с пресс-шайбой; *4* – матрица; *5* – передняя часть прутка; стрелка – направление перемещения инструмента

Fig. 1. Scheme of direct extrusion:

1 – ingot; *2* – container; *3* – punch with a pressure pad; *4* – die; *5* – the front of the rod; arrow – direction of tool motion

Можно обратить внимание на то, что схема отображает деформацию металла с малым обжатием, что не является характерным для процесса прессования, где коэффициенты вытяжек доходят до 1000 и более. В теории прессования рассматривается вопрос о назначении коэффициентов вытяжек не менее пяти для полуфабрикатов, предназначенных для последующей обработки давлением (первый вариант), и не менее десяти для полуфабрикатов, не обрабатываемых впоследствии давлением (второй вариант). Такие ограничения обусловлены возможностью не проработки сердцевины пресс-изделия из-за локализации пластической деформации в периферийных слоях [20].

Для пересчета коэффициентов вытяжек λ в иные показатели деформации, а также для связи между ними предусмотрены следующие формулы:

– для относительного обжатия по площади:

$$\varepsilon_{\%} = 100\,(\lambda - 1)/\lambda; \qquad (1)$$

– для степени деформации (иногда называемой логарифмической деформацией):

$$\varepsilon = \ln \lambda \qquad (2)$$

либо

$$\varepsilon = -\ln\,(1 - \varepsilon_{\%} / 100). \qquad (3)$$

Расчет по формулам (1) и (2) дает минимальные значения: $\varepsilon_{\%} = 80$ %, $\varepsilon = 1{,}61$ – для первого варианта и $\varepsilon_{\%} = 90$ %, $\varepsilon = 2{,}30$ – для второго варианта. Здесь видно, что несмотря на то что значения коэффициентов вытяжек минимальны, показатели деформации оказываются большими и часто они недостижимы в отдельных проходах прокатки как альтернативного процесса.

Процесс прессования осуществляется на горизонтальных гидравлических прессах. Прессовый инструмент в виде пресс-шайбы и матрицы подогревают до 380 °С в отдельно стоящей печи и монтируют в линии прессования. Температура контейнера 450 °С стабилизирована устройством подогрева. После выхода из матрицы прутки попадают на стеллаж пресса, а затем подвергаются резке на мерные длины, при этом передняя часть прутка отделяется, ее структура металла считается недостаточно проработанной пластической деформацией.

Существуют общие рекомендации в прессовом производстве, на основе которых дефектной признается передняя часть отпрессованного пресс-изделия на длине, примерно равной двум диаметрам. Например, при диаметре отпрессованного крупногабаритного прутка 360 мм придется вырезать переднюю часть длиной 720 мм и массой 198 кг. При массе исходного слитка на уровне 2 т отходы указанного типа составляют величину около 10 %. Такие большие отходы возникают именно при прессовании с малыми коэффициентами вытяжки, поскольку длина получаемого прутка оказывается небольшой и на ее фоне доля отрезаемого металла оказывается значительной.

На рис. 2, *а* показана передняя часть прутка на выходе из матрицы, а на рис. 2, *б* – поверхности реза прутков.

а *б*

Рис. 2. Передняя часть прутка на выходе из матрицы(*а*) и поверхности реза прутков (*б*)

Fig. 2. The front of the rod at the exit of the die (*a*) and the cutting surface of the rods (*б*)

Для оценки ситуации, возникающей на начальной стадии прессования, применен программный модуль DEFORM-2D и сформулирована следующая постановка краевой задачи. Напряженно-деформированное состояние является осесимметричным, материал прессового инструмента – абсолютно жесткий, материал слитка рассматривается как пластичный.

Заданы параметры вычислительной постановки: количество элементов сетки – 26 000, размер элемента в объеме слитка 1,0…1,2 мм; вблизи инструмента 0,5…0,7 мм.

Тепловые граничные условия максимальным образом приближены к производственным показателям: температура слитка 470 °С; температура контейнера 450 °С; температура матрицы и пресс-шайбы 380 °С; температура окружающей среды при выходе из матрицы 20 °С; коэффициент конвекции в окружающую среду 0,02 Н/с/мм/°С; коэффициент теплопередачи 11 Н/с/мм/°С. Коэффициенты и их размерности заимствованы из интерфейса программного модуля.

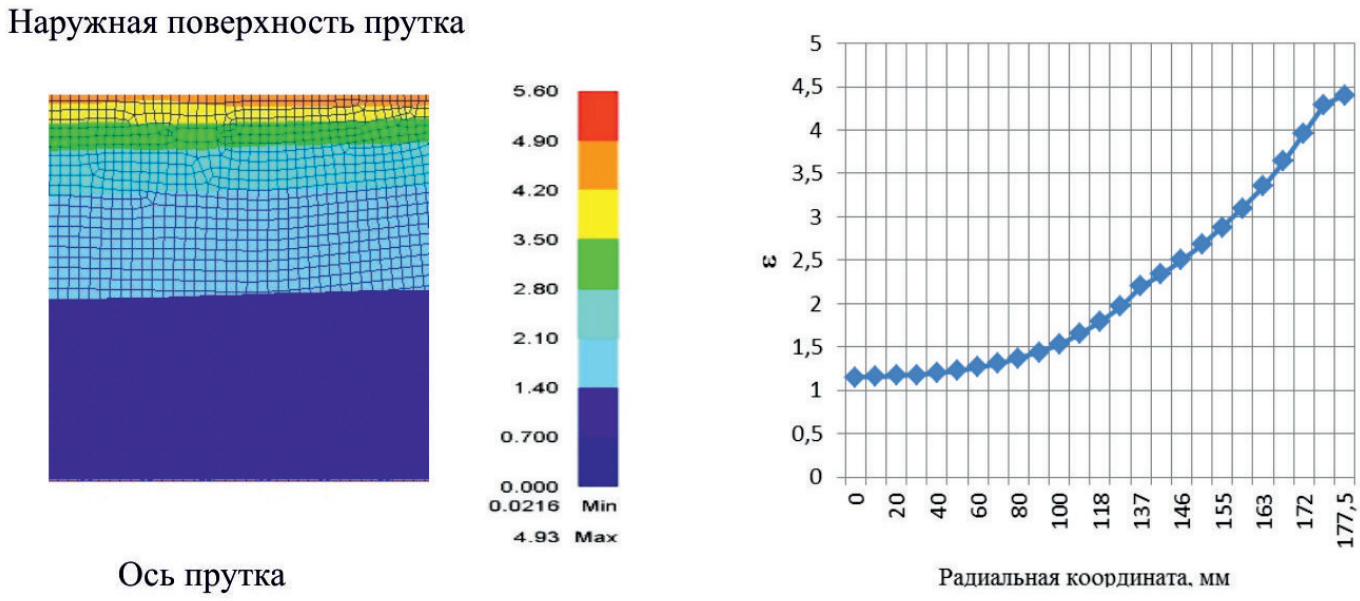
Скоростные граничные условия также привязаны к производственной обстановке: скорость движения пресс-штемпеля равна 3,66 мм/с, остальной прессовый инструмент неподвижен. Граничные условия трения в отличие от прокатки, где применяется закон Кулона, заданы законом Зибеля при показателе трения, равном 0,7 [21], что обусловлено высоким уровнем нормальных напряжений, характерным для прессования [22, 23]

Диаметр контейнера равен 800 мм, диаметр матрицы 355,6 мм, коэффициент вытяжки в этом процессе равен 5,06, т. е. это случай прессования с малым обжатием. В соответствии с формулами (1) и (2) можно оценить другие показатели деформации: $\varepsilon = 1{,}62$, $\varepsilon_{\%} = 80$ % .

Свойства деформируемой среды описываются моделью из интерфейса программы AL6061 Machining-Johnson: диапазон степени деформации (strain) 0…5; диапазон скорости деформации (strain rate) 0…100 000 $с^{-1}$; диапазон температур 20…550 °С. Дополнительно эти данные сверены со свойствами, приведенными в источнике [24].

Результаты и их обсуждение

На рис. 3, *а* отображен результат решения задачи в виде областей равного уровня степени деформации в стационарной стадии прессования для продольного сечения прутка. Соответственно на рис. 3, *б* представлен график распределения степени деформации вдоль радиальной координаты *r*. Здесь видно, что степень деформации распределяется неравномерно: в центре прутка степень деформации равна 1,1, а на периферии 4,5, отличие составляет 100(4,5…1,1)/1,1 = 309 %.



а *б*

Рис. 3. Распределение степени деформации ε в продольном сечении отпрессованного прутка в стационарной стадии (*а*) и график распределения этой величины вдоль радиальной координаты (*б*)

Fig. 3. Distribution of the strain degree ε in the longitudinal section of the pressed rod in the stationary stage (*a*) and the graph of the distribution of this value along the radial coordinate (*б*)

Эта часть решения приведена здесь для того, чтобы оценить разницу в свойствах металла в поперечном сечении в случае использования схемы прессования с малыми коэффициентами вытяжек.

На рис. 4 представлено решение задачи в виде областей равного уровня для переходного процесса от начальной нестационарной стадии к стационарной стадии.

Из рисунка видно, что если вдоль длины прутка в стационарной стадии (рис. 3) степень деформации сохранялась постоянной, то для передней части прутка это условие не выполняется. Наименьшие деформации локализованы в центре переднего торца прутка, наибольшие – локализованы ближе к периферии, но и они едва достигают значения 0,7. Можно напомнить, что степень деформации, определенная через площади поперечных сечений, составила 1,62, что в 2,3 раза больше. Для оценки полученной неравномерности построены графики (рис. 5) и введена относительная радиальная координата *r/R*, где *r* – текущий радиус прутка; *R* – радиус внешней поверхности прутка, равный половине диаметра прутка.

Ход графиков показывает, что по мере удаления от торца возрастают значения степени деформации от нулевого уровня до достижения уровня стационарного этапа прессования. Наиболее плотно расположены линии, построенные для центральной части прутка, что говорит о наименьшем градиенте в этой зоне. Ближе к периферии линии расположены более редко, что соответствует по характеру расположения ходу

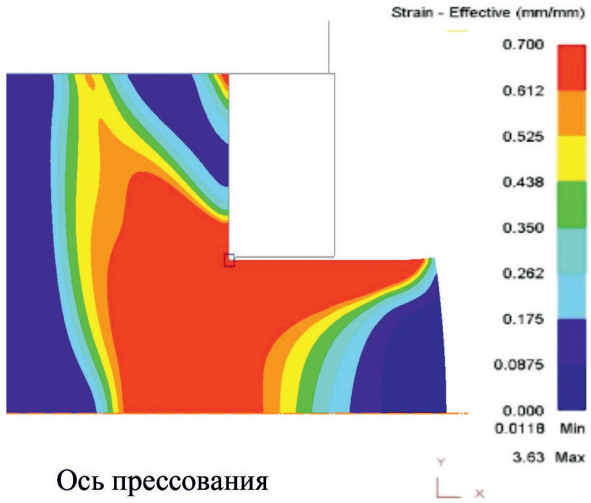


Рис. 4. Распределение степени деформации в продольном сечении в нестационарной начальной стадии

Fig. 4. Distribution of the strain degree in the longitudinal section in the nonstationary initial stage

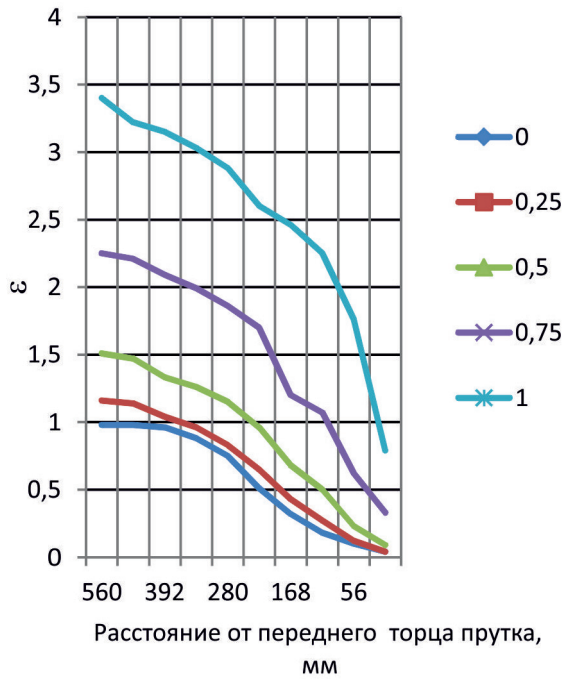


Рис. 5. График распределения степени деформации ε в поперечных сечениях прутка в зависимости от расстояния от переднего торца при различных относительных радиальных координатах *r/R*

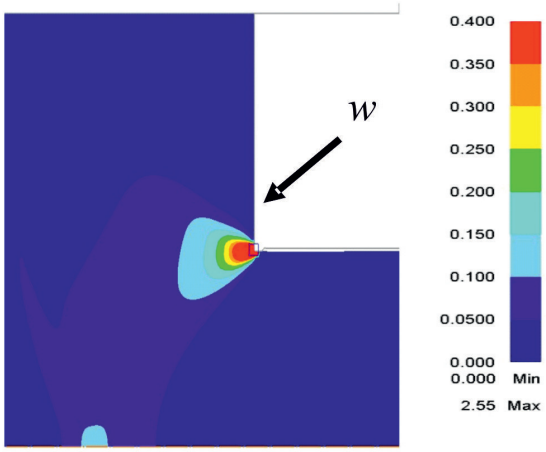
Fig. 5. Graph of the distribution of the strain degree in the cross sections of the rod depending on the distance from the front end at various relative radial coordinates *r/R*

графика, рис. 3, *б*, который был получен для стационарного этапа, однако при существенно других номинальных значениях параметра.

Анализ графика, представленного на рис. 5, показывает также, что центральные слои прутка приобретают постоянный уровень степени деформации раньше, чем периферийные слои, т. е. для них стационарность процесса достигается при меньшем перемещении металла.

Полученное распределение деформации распространяется на начальные и граничные условия поставленной задачи. В производстве существует большое разнообразие соотношений параметров. Затраты только машинного времени составили порядка двух недель без учета времени на отладку системы в течение нескольких месяцев. Поэтому перебор всех возможных вариантов производственных технологий и приемов обработки является довольно затратной процедурой. В данном случае выработаны рекомендации для рассмотренного варианта, но сделана попытка распространить их на класс технологий, связанных с прессованием слитков с малым обжатием.

Рассмотрение полей степени деформации помогает определить накопленную величину характеристики упрочнения. Однако здесь не видно, за счет чего достигается этот эффект. Поэтому на рис. 6 представлено поле скоростей деформации (размерность, $с^{-1}$).



Ось прессования

Рис. 6. Распределение скорости деформации (1/с) в продольном сечении (форма очага деформации); *W* – точка максимума

Fig. 6. Strain rate distribution (1/sec) in the longitudinal section (shape of the deformation zone); *W* – maximum point

Поскольку степень деформации является интегралом от скорости деформации по траектории перемещения элементарной частицы, то сформировать поле повышенных степеней деформации можно двумя способами: либо за счет высоких скоростей деформации, либо за счет длительного применения умеренных скоростей деформации. На рисунке видно, что вблизи начала калибрующего пояска матрицы образуется зона *W* очень высоких значений скоростей деформации. Собственно, в этом месте происходит резкое изменение направления перемещения металла и значительно увеличивается сдвиговая компонента тензора деформации.

Можно встать на позицию, что существует минимальная степень деформации, которая нужна для проработки структуры металла. Ранее было показано, что в рассмотренном примере относительное обжатие, рассчитанное по формуле (2), равно 80 %. Для достижения свойств и получения нужной структуры достаточно от-

носительное обжатие только 40 %, что соответствует в соответствии с формулой (3) степени деформации $\varepsilon = 0{,}51$. Как видно из графика, изображенного на рис. 5, это значение достигается уже при расстоянии от торца отпрессованного прутка 224 мм, что составляет 63 % от диаметра прутка. При этом установившиеся рекомендации предполагают удаление металла на длине до 200 % от диаметра прутка.

Следует отметить, что наличие слабодеформированной области в передней (выходной) части пресс-изделия неоднократно подтверждалось экспериментальными исследованиями, выполненными в основном методом координатных сеток [22, 23]. Однако эти исследования проводились, как правило, на модельном материале, например свинце, а также при гораздо меньших геометрических параметрах.

Применение метода конечных элементов позволило задать для решения реальные размеры заготовок и реальные свойства деформируемого материала.

Практическая ценность представленного исследования заключается в том, что по данным результатам расчета можно оценить степень деформации, полученную прутком в начальной нестационарной стадии прессования и принять решение, возможно ли использовать этот металл для дальнейшей обработки или его следует отправить на переплав.

Одна из проблем, возникающих после окончания процесса прессования, состоит в том, что необходимо произвести оценку механических свойств готового продукта. Это приходится делать, отбирая темплет, который расположен на определенном расстоянии от выходного конца. Это расстояние регламентировано стандартом. Каковы свойства продукта на меньшем или большем расстоянии от указанного места, остается неизвестным. Возможно, что часть отпрессованного прутка обладает необходимым уровнем физико-механических свойств, но их оказывается нечем измерить. Получается, что более простой выход – это направить возможно хороший металл на переплав. Наличие решения задачи методом конечных элементов позволяет построить картину распределения степени деформации и связать это распределение с распределением свойств при наличии заранее известных функциональных зависимостей.

Другим вариантом использования полученного решения является использование передней части отпрессованного прутка для повторного прессования на прессе меньшей мощности с получением изделия меньшего диаметра. В этом случае в первом приближении степени деформации на двух этапах прессования можно сложить, используя принцип аддитивности. При большей степени деформации будут достигнуты более высокие свойства продукта.

Выводы

В процессе прессования с малым коэффициентом вытяжки степень деформации распределяется неравномерно как по поперечному сечению пресс-изделия, так и по его длине. Разница между степенями деформации (логарифмическими) на оси и на периферии отпрессованного прутка может оказаться выше 300 %. В нестационарной начальной стадии прессования передняя часть прутка остается слабо деформированной как на периферии, так и в центре, что часто вынуждает отправлять ее на переплав вследствие недостаточно проработанной структуры металла. В то же время, если установить ограничения на минимально возможную степень деформации, то с помощью результатов расчета методом конечных элементов можно установить минимальную длину удаляемого металла, за счет чего удастся снизить массу отходов, направляемых в переплав.

Список литературы

1. Energy dissipation characteristics modelling for hot extrusion forming of aluminum-alloy components / H. Li, Y. Wu, H. Cao, F. Lu, C. Li // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology. – 2022. – P. 1–23. – DOI: 10.1007/s40684-021-00410-y.

2. Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloy / F. Zheng, H. Chen, W. Wang, R. Liu, J. Lian // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – DOI: 10.1007/s11665-022-06705-8.

3. *Дмитрюк А.И., Григорьев А.А.* Совершенствование технологии прессования алюминиевых заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. – 2020. – Т. 18, № 8. – С. 353–358.

4. *Li F., Chu G.-n.., Liu X.-j.* Deformation division of metal flow behavior during extrusion process of 7075 aluminum alloy // Journal of Central South University

of Technology. – 2009. – Vol. 16. – P. 738–742. – DOI: 10.1007/s11771-009-0122-3.

5. *Li F., Yuan S., He Z.* Effect of guiding angle on metal flow and defects in extrusion deformation // Cailiao Kexue yu Gongyi / Material Science and Technology. – 2007. – Vol. 15, N 1. – P. 15–18.

6. *Бережной В.Л.* Анализ и формализация представлений о неравномерности деформации для технологического развития прессования // Технология легких сплавов. – 2013. – № 1. – С. 40–57.

7. Plastic deformation analysis of accumulative back extrusion / S.C. Yoon, A.V. Nagasekhar, S.-Y. Kang, H.S. Kim // International Journal of Materials Research. – 2009. – Vol. 100 (12). – P. 1715–1719. – DOI: 10.3139/146.110236.

8. *Меркулова С.М., Бер Л.Б., Ростова Т.Д.* Изменение микроструктуры прутков из сплава 1561 в процессе прессования с увеличенной сдвиговой компонентой // Технология легких сплавов. – 2015. – № 3. – С. 85–89.

9. *Щербель Р.Д., Меркулова С.М.* Исследование возможности формирования равномерных по длине механических свойств крупногабаритных полос из сплава МА2-1 пч при прессовании с малыми вытяжками // Технология легких сплавов. – 2012. – № 4. – С. 103–109.

10. *Колмогоров В.Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.

11. *Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В.* Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах // Цветные металлы. – 2010. – № 5. – С. 119–122.

12. *Hawryluk M., Suliga M., Więcław M.* Application of physical modeling with the use of soft model materials for the analysis and optimization of metal extrusion processes // Physical Mesomechanics. – 2022. – Vol. 25. – P. 57–71. – DOI: 10.1134/s1029959922010076.

13. *Koloskov S., Sidelnikov S., Voroshilov D.* Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 288–294.

14. *Ershov A.A., Kotov V.V., Loginov Yu.N.* Capabilities of QForm-extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes // Metallurgist. – 2012. – Vol. 55 (9–10). – P. 695–701. – DOI: 10.1007/s11015-012-9489-8.

15. Numerical modeling of the extrusion process of aluminum alloy 6xxx series section / A. Kawałek, T. Bajor, M. Kwapisz, S. Sawicki, J. Borowski // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2021. – Vol. 56, iss. 2. – P. 375–381.

16. The development of grain structure during axisymmetric extrusion of AA3003 aluminum alloys / Y. Mahmoodkhani, M.A. Wells, W.J. Poole, L. Grajales, N. Parson // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46, iss. 12. – P. 5920–5932. –DOI: 10.1007/s11661-015-3168-x.

17. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process / X. Wu, G. Zhao, Y. Luan, X. Ma // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 435–436. – P. 266–274. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.114.

18. Simulation study on equal channel right angular extrusion process of aluminum alloy 6061 / W. Jiang, L. Wen, H. Yang, M. Hu, P.K.-L. Song // Light Metals 2020. – Cham: Springer, 2020. – P. 433–439. – (Minerals, Metals and Materials Series). – DOI: 10.1007/978-3-030-36408-3_61.

19. *Логинов Ю.Н., Полищук Е.Г., Тугбаев Ю.В.* Особенности моделирования процесса прессования труб из сплавов на основе циркония // Цветные металлы. – 2018. – № 9. – С. 82–87. – DOI: 10.17580/tsm.2018.09.13.

20. *Каргин В.Р., Дерябин А.Ю.* О конечно-элементном анализе напряженно-деформированного состояния при прессовании крупногабаритных прутков с малыми вытяжками // Технология легких сплавов. – 2016. – № 3. – С. 62–68.

21. *Каргин В.Р., Дерябин А.Ю.* Моделирование температурного поля при прессовании крупногабаритных прутков из труднодеформируемого алюминиевого сплава ENAW2014 с использованием программы Deform-2D // Технология легких сплавов. – 2016. – № 4. – С. 61–67.

22. *Баузер М., Зауер Г., Зигерт К.* Прессование: пер. с нем. – М.: Алюсил МВиТ, 2009. – 922 с.

23. *Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х.* Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 447 с.

24. Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures and different strain rates / X. Fan, T. Suo, Q. Sun, T. Wang // Acta Mechanica Solida Sinica. – 2013. – Vol. 26, N 2. – P. 111–120. – DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 39–49
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Deformations in the nonstationary stage of aluminum alloy rod extrusion process with a low elongation ratio

Yuri Loginov [1, 2, a,*], *Georgy Shimov* [1, b], *Natalia Bushueva* [1, c]

[1] Ural Federal University, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation
[2] M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS, 18 S. Kovalevskaya st., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-7222-2521, j.n.loginov@urfu.ru, [b] http://orcid.org/0000-0001-5763-0837, g.v.shimov@urfu.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-0603-8785, m0rgondagen@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 21 март 2022
Revised: 21 April 2022
Accepted: 29 April 2022
Available online: 15 June 2022

Keywords:
Extrusion process
Metal forming
Aluminum alloy
Finite element method
Plastic deformation

Funding
The study was financially supported by the Russian Science Foundation, agreement 22-29-00931 dated December 20, 2021.

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

ABSTRACT

Introduction. It is noted that extrusion is the main procurement process in the aluminum alloys forming operations. At the same time, the process has such a disadvantage as the nonstationarity of the metal plastic flow. **The work aim** is to establish the inhomogeneity deformation level of the pressed rod front part by numerical simulation using the finite element method. The study objectives are to formulate the extrusion process boundary conditions, to obtain a solution and to evaluate the inhomogeneity degree. **Research methods:** the finite element method was used to evaluate the deformed state. The actions sequence included the creation of primary deformation zone shape and the tool configuration. The mutual movement of the tool and the deformable material is set using the appropriate boundary conditions. The deformable medium is a ductile material with power-law hardening, the physical and mechanical properties correspond to the aluminum alloy of the 6000 series. **Results and discussion:** It is revealed that the strain degree in the pressed rod front part is extremely nonuniform distributed; differences above 300% are recorded. The strain degree distribution dependences in the rod cross sections are constructed depending on the distance from the front end at different relative radial coordinates. It is revealed that the rod central layers acquire a constant level of the strain degree earlier than the peripheral layers. The stationary process is achieved with less metal motion. **The work result application scope** is the technological study of rational metal cutting of aluminum alloys at the extrusion final stage in order to use recyclable waste more rationally. **Conclusions.** In the extrusion process with a low elongation ratio, the strain degree is distributed nonuniform both along the press rod cross and along its length. The rod front part remains weakly deformed both at the periphery and in the center in the nonstationary initial extrusion stage. It often forces to send for remelting due to the insufficiently developed metal structure. At the same time, if the limits on the minimum possible degree of deformation are set, then using the results of the calculation by the finite element method, the minimum length of the metal to be removed can be set, thereby reducing the mass of waste sent for remelting.

For citation: Loginov Yu.N., Shimov G.V., Bushueva N.I. Deformations in the nonstationary stage of aluminum alloy rod extrusion process with a low elongation ratio. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 39–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49. (In Russian).

References

1. Li H., Wu Y., Cao H., Lu F., Li C. Energy dissipation characteristics modelling for hot extrusion forming of aluminum-alloy components. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2022, pp. 1–23. DOI: 10.1007/s40684-021-00410-y.

*** Corresponding author**
Loginov Yuri N., Ph.D. (Engineering), Full Professor
Ural Federal University,
19 Mira st.,
620002, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 375-44-37, **e-mail:** j.n.loginov@urfu.ru

2. Zheng F., Chen H., Wang W., Liu R., Lian J. Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. DOI: 10.1007/s11665-022-06705-8.

3. Dmitryuk A.I., Grigor'ev A.A. Sovershenstvovanie tekhnologii pressovaniya alyuminievykh zagotovok [Enhancement of aluminum billets extrusion technology]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking productions in mechanical engineering*, 2020, vol. 18, no. 8, pp. 353–358.

4. Li F., Chu G.-n.., Liu X.-j. Deformation division of metal flow behavior during extrusion process of 7075 aluminum alloy. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, vol. 16, pp. 738–742. DOI: 10.1007/s11771-009-0122-3.

5. Li F., Yuan S., He Z. Effect of guiding angle on metal flow and defects in extrusion deformation. *Cailiao Kexue yu Gongyi / Material Science and Technology*, 2007, vol. 15, no. 1, pp. 15–18.

6. Berezhnoy V.L. Analiz i formalizatsiya predstavlenii o neravnomernosti deformatsii dlya tekhnologicheskogo razvitiya pressovaniya [Analysis and formalization of insights about nonuniformity of strain for technological development of extrusion]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2013, no. 1, pp. 40–57.

7. Yoon S.C., Nagasekhar A.V., Kang S.-Y., Kim H.S. Plastic deformation analysis of accumulative back extrusion. *International Journal of Materials Research*, 2009, vol. 100 (12), pp. 1715–1719. DOI: 10.3139/146.110236.

8. Merkulova S.M., Ber L.B., Rostova T.D. Izmenenie mikrostruktury prutkov iz splava 1561 v protsesse pressovaniya c uvelichennoi sdvigovoi komponentoi [Alteration in 1561 alloy bar microstructure during extrusion process carried out with an increased shear component]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2015, no. 3, pp. 85–89.

9. Shcherbel R.D., Merkulova S.M. Issledovanie vozmozhnosti formirovaniya ravnomernykh po dline mekhanicheskikh svoistv krupnogabaritnykh polos iz splava MA2-1 pch pri pressovanii s malymi vytyazhkami [Investigation of the possibility of formation of uniform mechanical properties through length in large_size MA2-1pch alloy strips in the case of extrusion with Low reductions]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2012, no. 4, pp. 103–109.

10. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya. Deformatsii. Razrushenie* [Stress, Deformation. Fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 229 p.

11. Loginov Yu.N., Antonenko L.V. Izuchenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dlya preduprezhdeniya obrazovaniya prodol'nykh treshchin v pressovannykh trubakh [Research of the strain-stress state for the prevention of longitudinal splits formation in the extruded pipes]. *Tsvetnye metally*, 2010, no. 5, pp. 119–122. (In Russian).

12. Hawryluk M., Suliga M., Więcław M. Application of physical modeling with the use of soft model materials for the analysis and optimization of metal extrusion processes. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25, pp. 57–71. DOI: 10.1134/s1029959922010076.

13. Koloskov S., Sidelnikov S., Voroshilov D. Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion. *Solid State Phenomena*, 2021, vol. 316, pp. 288–294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.288.

14. Ershov A.A., Kotov V.V., Loginov Yu.N. Capabilities of QForm-extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes, *Metallurgist*, 2012, vol. 55 (9–10), pp. 695–701. DOI: 10.1007/s11015-012-9489-8.

15. Kawałek A., Bajor T., Kwapisz M., Sawicki S., Borowski J. Numerical modeling of the extrusion process of aluminum alloy 6xxx series section. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2021, vol. 56, iss. 2, pp. 375–381.

16. Mahmoodkhani Y., Wells M.A., Poole W.J. Grajales L., Parson N. The development of grain structure during axisymmetric extrusion of AA3003 aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, iss. 12, pp. 5920–5932. DOI: 10.1007/s11661-015-3168-x.

17. Wu X., Zhao G., Luan Y., Ma X. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 435–436, pp. 266–274. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.114.

18. Jiang W., Wen L., Yang H., Hu M., Song P.K.-L. Simulation study on equal channel right angular extrusion process of aluminum alloy 6061. *Light Metals 2020. The Minerals, Metals and Materials Series*. Cham: Springer, 2020, pp. 433–439. DOI: 10.1007/978-3-030-36408-3_61.

19. Loginov Yu.N., Polishchuk E.G., Tugbaev Yu.V. Osobennosti modelirovaniya protsessa pressovaniya trub iz splavov na osnove tsirkoniya [Features of the zirconium-based alloys tube pressing process modeling]. *Tsvetnye Metally*, 2018, no. 9, pp. 82–87. DOI: 10.17580/tsm.2018.09.13. (In Russian).

20. Kargin V.R., Deryabin A.Yu. O konechno-elementnom analize napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri pressovanii krupnogabaritnykh prutkov s malymi vytyazhkami [On a finite element analysis of the stress-strain state in the case of large-size bar extruding with low extrusion ratios]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2016, no. 3, pp. 62–68.

21. Kargin V.R., Deryabin A.Yu. Modelirovanie temperaturnogo polya pri pressovanii krupnogabaritnykh prutkov iz trudnodeformiruemogo alyuminievogo splava ENAW2014 s ispol'zovaniem programmy Deform-2D [Simulation of a temperature field with the use of Deform-2D sowtware for extrusion of large-size difficult-to-Deform ENAW2014 aluminium alloy bars]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2016, no. 4, pp. 61–67.

22. Bauser M., Sauer G., Siegert K., eds. *Extrusion*. ASM International, 2006. 592 p. (Russ. ed.: Bauzer M., Zauer G., Zigert K. *Pressovanie*. Moscow, Alyusil MViT Publ., 2009. 922 p.).

23. Perlin I.L., Raitbarg L.Kh. *Teoriya pressovaniya metallov* [Theory of metal extrusion]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 447 p.

24. Fan X., Suo T., Sun Q., Wang T. Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures and different strain rates. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2013, vol. 26, no. 2, pp. 111–120. DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

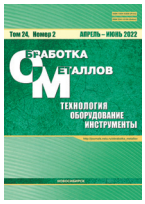
© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2022 Том 24 № 2 с. 50–66
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки

Сергей Сундуков *

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

https://orcid.org/0000-0003-4393-4471, sergey-lefmo@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.9.048.6 + 679.7.027.4

История статьи:
Поступила: 25 марта 2022
Рецензирование: 13 мая 2022
Принята к печати: 15 мая 2022
Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:
Ультразвук
Сварка
Колебания
Кавитация
Микроструктура
Дендритная ликвация

Финансирование:
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00185, https://rscf.ru/project/21-79-00185/

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Основной проблемой получения сварочных соединений является неравномерный нагрев зоны соединения, что приводит к различиям структуры и свойств между металлом шва и основным металлом. Одним из способов интенсификации процесса сварки является применение ультразвуковых колебаний. В результате анализа способов введения ультразвуковых колебаний в ванну расплава для проведения экспериментальных исследований выбран способ наложения колебаний на свариваемые элементы, так как данный способ позволяет оказывать воздействие на протяжении всего сварочного цикла от формирования ванны расплава до полной кристаллизации металла. **Методика исследований.** Проведение экспериментальных исследований осуществлялось на пластинах из углеродистой конструкционной стали Ст3 и алюминиевого деформируемого неупрочняемого сплава АМг4. В качестве источника колебаний применялась стержневая магнитострикционная колебательная система, торец которой жестко закреплялся на одной из свариваемых пластин. Для определения мест приложения источника колебаний и зоны сварки предложен метод расчета на основе равенства резонансных частот используемой колебательной системы и собственной частоты свариваемого элемента. Показано, что оптимальными местами для приложения колебаний и проведения сварки будут пучности колебаний, имеющие максимальную амплитуду. Получение швов осуществлялось методом полуавтоматической сварки в среде защитных газов. **Результаты и обсуждение.** Исследование микроструктуры полученных образцов показало значительное уменьшение доли дендритной ликвации. Изменения структуры являются следствием эффектов, возникающих в жидком расплаве, при введении ультразвуковых колебаний. Основными эффектами являются звуковое давление, кавитация и акустические течения. Возникающие эффекты оказывают влияние на кинетику процесса кристаллизации – увеличивается степень переохлаждения, увеличивается количество образуемых в единицу времени зародышей кристаллизации и уменьшается скорость их роста. Изменения структуры металла шва приводят к повышению качества сварного соединения, у которого снижаются сварочные деформации, увеличивается временное сопротивление и значительно повышается пластичность.

Для цитирования: *Сундуков С.К.* Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 50–66. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.

Введение

Сварка является ключевым способом получения неразъемных соединений в различных отраслях машиностроения. Создание прочных связей между атомами или молекулами соединяемых поверхностей с использованием нагрева или поверхностно-пластического деформирования обеспечивает получение качественного соединения как однородных и разнородных металлов и сплавов, так и их соединения с неметаллическими материалами [1].

Среди существующих видов сварки в настоящее время преобладает применение сварки плавлением. Основной проблемой при проведении данного вида сварки является неравномерный нагрев соединяемых деталей [2]. В результате сварной шов вследствие кристаллизации расплавленных и перемешанных основного и

***Адрес для переписки**
Сундуков Сергей Константинович, к.т.н., доцент
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Ленинградский проспект, 64,
125319, г. Москва, Россия
Тел.: 8 (926) 369-19-70, **e-mail:** sergey-lefmo@yandex.ru

присадочного металла имеет литую структуру, вблизи границы сплавления находится зона частичного оплавления основного металла, далее следует зона термического влияния, которая характеризуется изменением структуры под влиянием температур, возникающих по мере удаления от зоны сварки [3]. Из-за различия структур переходы между рассмотренными зонами сопровождаются изменениями механических свойств, что особенно резко выражено при переходе через границу сплавления, которая в связи с этим является слабым местом сварного соединения.

Наряду с неравномерностью структуры проблемами сварки являются остаточные напряжения, сварочные деформации и возникновение пористости шва [4–7].

На данный момент для борьбы с рассмотренными недостатками применяются различные методы, которые можно классифицировать на применяющиеся в процессе проведения сварки и после нее. К методам, применяемым в процессе сварки, относятся уравновешивание деформаций за счет рациональной последовательности наложения швов, создание обратных деформаций, жесткое закрепление свариваемых элементов. Методы, применяемые после сварки, это термообработка сварного шва, механическая правка конструкций, термическая правка, поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [8].

Одним из эффективных способов минимизации последствий от указанных недостатков также является вибрационная обработка металла, находящегося в расплавленном состоянии [9, 10].

Данный способ воздействия, применительно к кристаллизующемуся металлу, был впервые предложен еще в 1950 году Д.К. Черновым для улучшения структуры слитков после литья. В результате вибраций повышается однородность слитков за счет диспергирования растущих дендритов [11, 12].

Для обеспечения эффективного воздействия на формирование структуры сварного шва, кристаллизация которого в разы быстрее, целесообразно применять высокочастотные вибрации ультразвуковой частоты, что позволит оказывать значительное воздействие за ограниченный временной интервал.

Существуют следующие способы применения ультразвуковых колебаний в процессе сварки:

– наложение колебаний на электрод [13];

– наложение колебаний на неплавящийся электрод [14];

– передача колебаний на корпус газовой горелки [15];

– сообщение колебаний свариваемым элементам конструкции [16];

– использование дуги как источника ультразвукового излучения [17].

Результаты исследований, проводимых по данным способам, фиксируют положительное влияние на процесс сварки и структуру шва. В частности, в зависимости от метода может увеличиваться глубина проплавления основного металла, снижаться пористость шва, улучшаться условия переноса капель расплавленного металла от электрода к детали, измельчаться микроструктура шва, снижаться доля дендритной ликвации в металле шва, повышение механических свойств [18–22]. Подробнее результаты можно найти в обзорных работах по данной тематике [23, 24].

Влияние ультразвуковой обработки на формирование структуры кристаллизующегося металла шва имеет явный положительный эффект.

Тем не менее данные технологии в настоящее время не нашли широкого применения в сварочных процессах по сравнению, например, с ультразвуковым ППД, который применяется для постобработки сварных швов [25–27]. Это можно объяснить рядом причин.

1. Необходимость использования дополнительного оборудования – ультразвукового генератора и колебательной системы.

2. Сложность организации процесса, связанная с согласованием режимов сварки и акустико-технологических параметров ультразвукового воздействия.

3. Предпочтительно использование более сложных и крупногабаритных магнитострикционных преобразователей, требующих принудительного охлаждения, так как пьезокерамические теряют эффективность при высоких температурах.

4. Повышение энергетических затрат на проведение сварочного процесса.

Несмотря на возникающие сложности, возможности применения ультразвуковых колеба-

ний обусловливают интерес к развитию данных технологий.

В данной работе приведены результаты исследований по наложению ультразвуковых колебаний на свариваемые элементы, выбору места приложения источника колебаний и зоны проведения сварки.

Методика исследований

Материалы

Для проведения исследований выбраны материалы, широко применяющиеся в сварочном производстве: углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качеств Ст3 и деформируемый термически неупрочняемый алюминиево-магниевый сплав АМг4.

Пластины для сварки вырезались из листовой заготовки толщиной 4 мм.

В качестве присадочного материала применялись сварочные проволоки, подходящие для сварки выбранных материалов: для Ст3 – проволока Св08Х2ГС, для АМг4 – проволока ER5356. Диаметр проволок составлял 0,8 мм.

Химические составы материалов и проволок приведены в табл. 1 и 2.

Экспериментальная схема и оборудование

Исследования проводились в два этапа по схеме, представленной на рис. 1.

Первый этап заключался в наплавке шва на пластины толщиной 4 мм и шириной 30 мм и последующем определении изменений в структуре зоны сварки. На втором этапе производилась сварка двух пластин и проводились испытания соединения на растяжение. Длина пластин определялась на основе распределения по ним колебаний (рассмотрено ниже).

Для возбуждения колебаний в зоне сварки к пластине *1* через резьбовое соединение *4* присоединялась ультразвуковая стержневая колебательная система, состоящая из магнитострикционного преобразователя *6* и волновода *5*, выполненного из титанового сплава. Диаметр

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава АМг4 и проволоки ER5356, масс. %

Chemical composition of AMg4 alloy and ER5356 wire, mass. %

Сплав АМг4									
Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Be	Mg	Zn	Al
<0,4	<0,4	0,5...0,8	0,05...0,25	0,02...0,1	<0,05	0,0002...0,005	3,8...4,8	<0,2	Остальное
Сварочная проволока ER5356									
<0,1	<0,25	0,55	0,12	0,12	–	–	5,0	–	Остальное

Таблица 2

Table 2

Химический состав стали Ст3 и проволоки Св08Х2ГС, масс. %

Chemical composition of steel St3 and wire Sv08Kh2GS, mass. %

Сталь Ст3									
C	**Si**	**Mn**	**Ni**	**Cr**	**Cu**	**S**	**P**	**As**	**Fe**
0,14...0,22	0,15...0,3	0,4...0,65	<0,3	<0,3	<0,3	<0,05	<0,04	<0,08	Остальное
Сварочная проволока Св08Х2ГС									
<0,1	0,6...0,85	1,4...1,7	<0,025	1,8...2,2	<0,025	<0,015	<0,013	–	Остальное

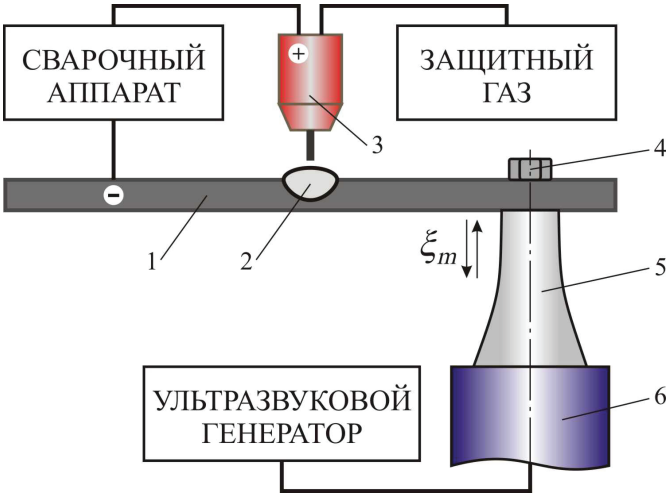


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

1 – пластина; *2* – сварной шов; *3* – газовая горелка; *4* – болт; *5* – волновод; *6* – магнитострикционный преобразователь

*Fig. 1. D*esign of experiment:

1 – plate; *2* – weld; *3* – welding torch; *4* – bolt; *5* – waveguide; *6* – magnetostrictive transducer

волновода соответствует ширине пластины и составляет 30 мм.

Для питания колебательной системы использовался ультразвуковой генератор УЗГ 2,0/22 с функциями автоматической подстройки частоты и амплитуды. Данные функции позволяют поддерживать стабильный режим колебаний в условиях повышения температуры и изменения объема пластины, возникающих при сварке.

Перед началом сварки поверхность пластины обрабатывалась дисковой металлической щеткой и обезжиривалась. Далее включался ультразвук и производилась сварка. Выключение ультразвука осуществлялось при остывании сварного соединения до 100 °С, чтобы все фазовые превращения происходили под действием колебаний.

Получение сварного шва производилось методом полуавтоматической сварки в среде защитных газов. В табл. 3 приведены оборудование и режимы сварки для Ст3 и АМг4.

Одним из самых важных моментов при проведении сварки с наложением колебаний является определение места их приложения к пластине и места сварки, в котором должно обеспечиваться стабильное ультразвуковое воздействие.

Методика определения места приложения колебаний и наложения шва на примере АМг4

В применяемой схеме наложения ультразвуковых колебаний при нормально ориентированном расположении колебательной системы к свариваемой пластине она является излучателем изгибных колебаний.

С точки зрения технологического применения оптимальным местом приложения колебаний будет являться одна из пучностей собственных колебаний пластины. Тогда задача сводится к согласованию резонансных частот колебательной системы и пластины.

Таблица 3

Table 3

Оборудование и режимы сварки

Equipment and welding modes

Параметры сварки	Материал	
	Ст3	АМг4
Тип сварочного аппарата	MIG 235	MIG 215AL PULSE
Сила сварочного тока, $I_{св}$, А	60	125
Полярность	Обратная	Обратная
Напряжение, $U_{св}$, В	28	22
Скорость подачи проволоки, $V_{пр}$, м/мин	1,9	15,2
Защитный газ	Углекислый газ	Аргон
Расход защитного газа, л/мин	8	17,5
Время наплавки, с	12	2

Так как при проведении исследований используется серийная ультразвуковая колебательная система, имеющая определенную резонансную частоту f, то расчет произведем исходя из необходимости обеспечения равной резонансной частоты пластины $f_п$.

Амплитудно-частотная характеристика колебательной системы (рис. 2) снималась на торце волновода индикатором часового типа. Резонансная частота составляет f = 21 800 Гц.

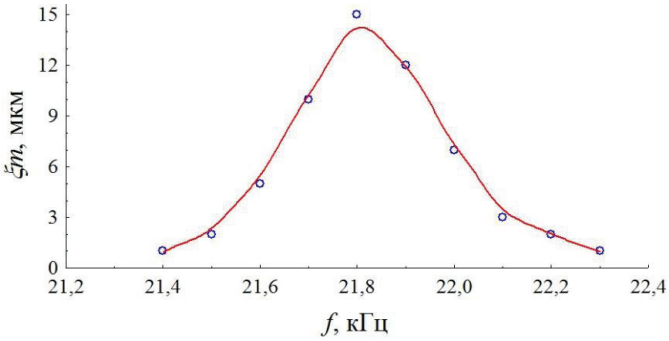


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ПМС-2,0-22

*Fig. 2. A*mplitude-frequency characteristic PMS-2.0-22

Дифференциальное уравнение изгибных колебаний пластины имеет вид [28]

$$\frac{d^4\xi_m}{dx^4} - \frac{\omega_0^2}{c\chi^2}\xi_m + \frac{\omega_0^2}{c^2}\frac{d^2\xi_m}{dx^2} = 0,$$

где ξ_m – амплитуда колебаний; ω_0 – круговая частота собственных колебаний; x – координата пластины в продольном направлении; c – скорость распространения продольных колебаний; χ – радиус инерции поперечного сечения,

$$\chi = \sqrt{I / S},$$

где I – момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости колебаний; S – площадь поперечного сечения.

Для используемой пластины прямоугольного сечения (30×4 мм):

$$\chi = \sqrt{\frac{bh^3}{12} / bh} = 0,0012.$$

При соблюдении условия $\frac{\chi^2}{l^2} \le 0,05$ (для рассматриваемого случая 0,0006) можно пренебречь инерцией вращения, тогда уравнение установившихся колебаний принимает следующий вид:

$$\frac{d^4\xi_m}{dx^4} - \frac{\omega_0^2}{c\chi^2}\xi_m = 0.$$

Решение данного уравнения получено А.Н. Крыловым (1936 г.):

$$\xi_m = C_1A_x + C_2B_x + C_3C_x + C_4D_x,$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий:

$$A_x = \left(\mathrm{ch}(kx) + \cos(kx)\right) / 2;$$

$$B_x = \left(\mathrm{sh}(kx) + \sin(kx)\right) / 2;$$

$$C_x = \left(\mathrm{ch}(kx) - \cos(kx)\right) / 2;$$

$$D_x = \left(\mathrm{sh}(kx) - \sin(kx)\right) / 2.$$

Для определения постоянных необходимо использовать выражения для производных:

$$\xi'_m = k(C_1D_x + C_2A_x + C_3B_x + C_4C_x),$$

$$\xi''_m = k^2(C_1C_x + C_2D_x + C_3A_x + C_4B_x),$$

$$\xi'''_m = k^3(C_1B_x + C_2C_x + C_3D_x + C_4A_x).$$

Здесь коэффициент k – волновой множитель, зависящий от свойств материала и частоты колебаний:

$$k = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EI}}, \qquad (1)$$

где E – модуль Юнга материала волновода (для АМг4 E=71 ГПа); m – масса волновода на единицу длины (для рассматриваемого случая $m = bhl\rho = 0,03 \cdot 0,004 \cdot 1 \cdot 2670 = 0,320$ кг/м), круговая частота $\omega = 2\pi f_п$, где $f_п$ – резонансная частота собственных колебаний пластины.

Для определения характера распространения колебаний в зависимости от условий закрепления пластины воспользуемся алгоритмом, описанным Б.В. Булгаковым (1954 г). По данному алгоритму граничные условия записываются в развернутом виде, что приводит к однородным уравнениям относительно постоянных. Для того чтобы постоянные не равнялись нулю, нужно, чтобы определитель, составленный из коэффициентов системы уравнений, был равен нулю.

Расчетная схема показана на рис. 3.

Необходимо выбрать место приложения ультразвуковых колебаний x, чтобы в зоне сварки $l_{св}$

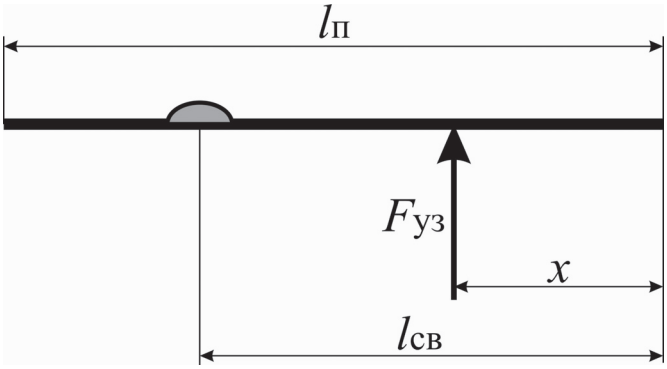


Рис. 3. Схема расчета изгибных колебаний:
$l_п$ – длина пластины; x – место приложения ультразвуковых колебаний; $l_{св}$ – место наложения шва

Fig. 3. Scheme for calculating bending vibrations:
l_p is the length of the plate; x is the place of ultrasonic vibrations application; l_{weld} is the place where the weld is applied

был максимум амплитуды колебаний. Для данных условий закрепления (свободные концы пластины с двух сторон): для $l_{уз} = 0$ и для $l_{уз} = l_п$: $\xi''_m = 0$ и $\xi'''_m = 0$, постоянные $C_3 = 0$ и $C_4 = 0$. Подставляя данные значения в решение уравнения колебаний, получим частотное уравнение:

$$\mathrm{ch}(kl_п)\cos(kl_п) = 1.$$

Корни данного уравнения:

$$kl_п = \pi n + \pi / 2, \qquad (2)$$

где $n = 1, 2, 3...$

Выразим из уравнения (2) коэффициент k и приравняем к уравнению (1):

$$\frac{\pi n + \pi / 2}{l_п} = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EI}}.$$

С учетом того, что $\omega = 2\pi f_п$, получим выражение для определения длины пластины в зависимости от частоты колебаний:

$$l_п = \frac{\pi n + \pi / 2}{\sqrt[4]{\frac{m(2\pi f_п)^2}{EI}}}. \qquad (3)$$

Произведем расчет из условия $f_п \approx 21\ 800$ Гц при различном значении n. Расчетные значения занесем в табл. 4.

Таким образом, размер пластины, обеспечивающий колебания на резонансной частоте 21 800 Гц, соответствует 7-й моде колебаний и составляет 155 мм (данный размер выбран для проведения исследований).

Таблица 4
Table 4

Зависимость резонансной длины пластины от *n* при частоте 21 800 Гц
Dependence of the resonant length of the plate on *n* at frequency of 21 800 Hz

n	1	2	3	4	5	6	**7**	8
$l_п$	0,031	0,052	0,072	0,093	0,114	0,134	**0,155**	0,176
k	151,6							

Коэффициент k позволяет связать частоту и скорость распространения изгибных колебаний $c_и$:

$$k = \frac{\omega}{c_и},$$

где

$$c_и = \sqrt{2\pi f \chi c} = 904,5 \text{ м/с},$$

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – стержневая скорость продольных колебаний (для АМг4 5157 м/с).

Зная скорость и частоту, можно найти длину изгибной волны:

$$\lambda_и = \frac{c_и}{f_п} = 41,3 \text{ мм}. \qquad (4)$$

Таким образом, при сообщении ультразвуковых колебаний в длину пластины укладывается $l_п / l_и = 3,75$ изгибных волны. Учитывая, что края пластины свободны и на них не может быть нуля колебаний, построим график распределения колебаний по пластине (рис. 4).

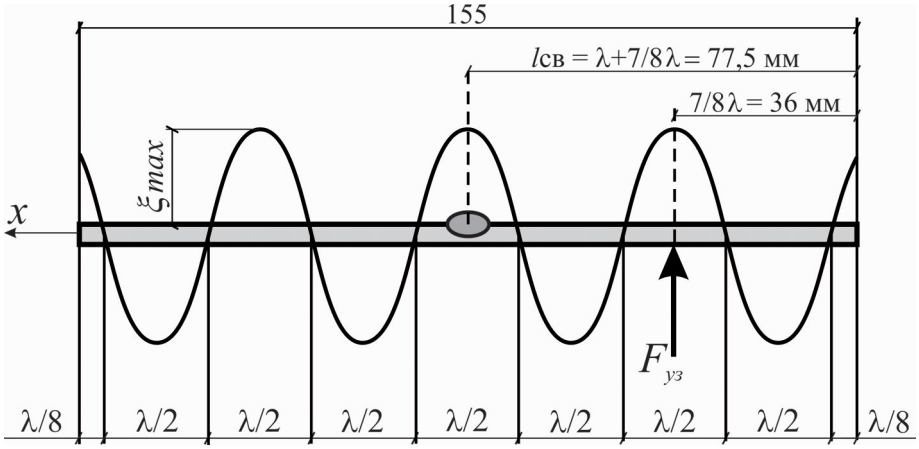


Рис. 4. Распределение колебаний по свариваемой пластине

Fig. 4. Distribution of vibrations over the welded plate

Узлы колебаний, где амплитуда равна нулю, располагаются на расстоянии длины полуволны со смещением на одну восьмую длины волны $x_1 = (\lambda_и/2)i + \lambda_и/8$ (i = 0, 1, 2…), а пучности колебаний с максимальной амплитудой на расстоянии четверти волны от узлов $x_2 = (\lambda_и/2)i + \lambda_и/8 - \lambda_и/4$. Места расположения сварочного шва и приложения ультразвуковых колебаний должны выбираться в соответствии с расстоянием x_2.

Таким образом, для проведения экспериментальных исследований торец колебательной системы закреплялся на расстоянии $7/8\lambda_и$, что соответствует 36 мм, а место наложения шва $15/8\lambda_и$, что соответствует 77,5 мм, и находится посередине пластины.

В результате аналогичных расчетов для стали Ст3 выбрана длина пластины 130 мм, место закрепления колебательной системы 30 мм, место наложения шва 65 мм.

При проведении второй стадии исследований – сварки двух пластин и определении механических свойств соединения использовались такие же размеры. Пластина разрезалась посередине, далее части пластины подваривались по краям таким образом, что между пластинами оставалось расстояние 0,5 мм, разделка кромок не осуществлялась. При такой подготовке образцов передача колебаний ко второй пластине осуществляется через сварочные точки по краям и характер распределения колебаний при этом не изменяется. Время сварки составляло: для АМг4 – 3,5 с, для Ст3 – 16 с.

Определение структуры и свойств

После проведения наплавки из пластин вырезались образцы для дальнейшего исследования поверхности. Выборка образцов осуществлялась так, что исследуемой поверхностью являлось поперечное сечение, находящееся в середине шва. У полученных образцов исследовались микро- и субмикроструктура.

Подготовка образцов для анализа заключалась в заливке их протакрилом, после остывания которого подготавливались шлифы.

Микроструктура изучалась на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-22 (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург).

После сварки двух пластин у полученных соединений измерялся прогиб, вызванный усадкой металла. Далее соединения, соответствующие по размеру образцам типа XII в соответствии с ГОСТ 6996–66, испытывались на растяжение.

Для измерения прогиба использовался контурограф модели 220 (АО «Протон», Зеленоград), предназначенный для измерения геометрических параметров изделий различной формы. Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом с индуктивным датчиком путем перемещения щупа по измеряемой поверхности и последующего преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в цифровой сигнал. Далее необходимые измерения осуществляются в программе обработки профиля поверхности.

Испытания образцов на растяжение проводились на разрывной машине УТС-110М-50-0У, предназначенной для измерения нормированного значения меры силы при проведении механических испытаний в режиме растяжения или сжатия образцов конструкционных материалов.

Результаты и их обсуждение

Влияние параметров ультразвука на характер колебаний

Для оценки характера колебаний, возникающих при реализации выбранной схемы эксперимента, производилась визуализация распределения колебаний по пластине путем нанесения на ее поверхность порошка гидрокарбоната натрия (рис. 5).

При включении ультразвука порошок распределяется по пластине в соответствии с амплитудой колебаний: вытесняется из зоны пучностей и скапливается в узлах.

Резонансная частота составила f = 21 100 Гц, что на 700 Гц меньше расчетной (погрешность 3,2 %). Это объясняется механическими потерями при преобразовании продольных колебаний источника в изгибные колебания излучателя (пластины) и тем, что расчет производился при точечном приложении колебаний, а в исследованиях площадь контакта поверхностей равна площади торца волновода, имеющего диаметр 30 мм.

Так как частота постоянна, режимы обработки определялись изменением амплитуды колебаний.

Сравнивались три режима ультразвуковых колебаний: низкоамплитудный (ξ_m = 3…4 мкм); промежуточный (ξ_m = 9…10 мкм) и высокоамплитудный (ξ_m = 13…15 мкм).

Анализ характера распределения колебаний показывает, что зоны максимумов и минимумов амплитуды неоднородны по форме, что связано со сложным характером колебаний пластины – помимо изгибных колебаний в продольном направлении (для которых производился расчет) присутствуют поперечные изгибные колебания, которые приводят к некоторому закруглению узлов колебаний, что особенно хорошо заметно в наиболее удаленных от крепления узлов на низкоамплитудном и промежуточном режимах. Также присутствуют продольные колебания, передающиеся от волновода, доля которых

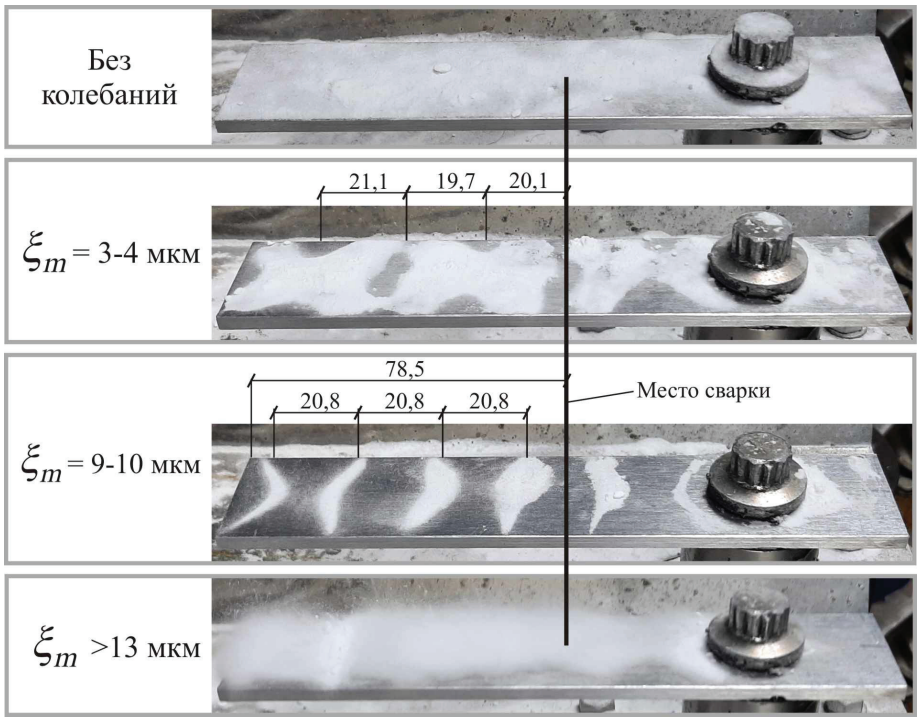


Рис. 5. Визуализация распределения колебаний по пластине АМг4

Fig. 5. Visualization of oscillation propagation along a plate made of AMg4 alloy

увеличивается при повышении мощности. Так, на высокоамплитудном режиме продольные колебания преобладают над остальными, что в совокупности с большой амплитудой приводит к полному ссыпанию порошка с пластины (на рис. 6 представлены первые мгновения данного процесса).

При мощностях 200 и 350 Вт преобладают изгибные колебания и на пластинах хорошо определяются зоны пучности и узлов колебаний.

На низкоамплитудном режиме они менее выражены, так как вследствие низких амплитуд порошок меньше вытесняется из зоны колебаний и соответственно ширина узлов значительно больше. Поэтому при измерении полуволны ее длина колеблется от 19,7 до 21,1 мм, при этом колебания неравномерны по ширине пластины, например на участке, где отмечена полуволна 19,7 мм, с одной стороны пучность располагается в центральной зоне, а с другой по краям.

На промежуточном режиме полученная картина в значительной степени соответствует расчетным показателям. Зоны колебаний ярко выражены, расстояние между узлами колебаний практически одинаково по длине пластины и составляет 20,8 мм. Если произвести расчет по формуле (4) для частоты 21 100 Гц, то длина полуволны составит $\lambda_и/2$ = 21 мм, погрешность в этом случае 1 %. Полученная разница в 200 Гц не играет существенной роли при выборе места сварки, так как на данном режиме ширина зоны пучности больше узлов и смещение на 0,2 мм не повлияет на характер колебаний в зоне сварки.

На высокоамплитудном режиме вследствие преобладания радиальной составляющей колебания происходят по всей длине пластины. При этом наблюдаются зоны максимума и минимума колебаний, которые по расположению коррелируют с другими режимами. На фотографии пластины (рис. 5) на ближнем торце видно, что порошок ссыпается с зоны максимума амплитуды быстрее, чем с зоны минимума.

Оптимальным местом сварки (на рис. 5 показано жирной линией) для низкоамплитудного и промежуточного режима является расстояние 78,5 мм от левого края пластины, что на 1 мм больше расчетной длины $l_{св}$ = 77,5 мм. На высокоамплитудном режиме сварку можно проводить в любом месте.

Дальнейшие исследования проводились на промежуточном режиме, так как по сравнению с другими он позволяет получить стабильное распределение колебаний по пластине. Результаты предварительных экспериментов показали также лучшее воздействие на структуру шва. При низкоамплитудном режиме эффекта практически не наблюдается, а на высокоамплитудном возможно сильное разбрызгивание капель жидкого металла (ультразвуковое распыление) и появление значительного количества пор.

Изменения микроструктуры

В результате наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки приводят к изменениям микроструктуры сварного шва (рис. 6 и 7).

Для Ст3 эффект от действия колебаний состоит в значительном уменьшении доли дендритной ликвации, а для АМг4 в уменьшении высоты зоны дендритов. Разный характер воздействия обусловлен более длительным временем кристаллизации стали по сравнению с алюминием, что позволяет колебаниям осуществить большее воздействие.

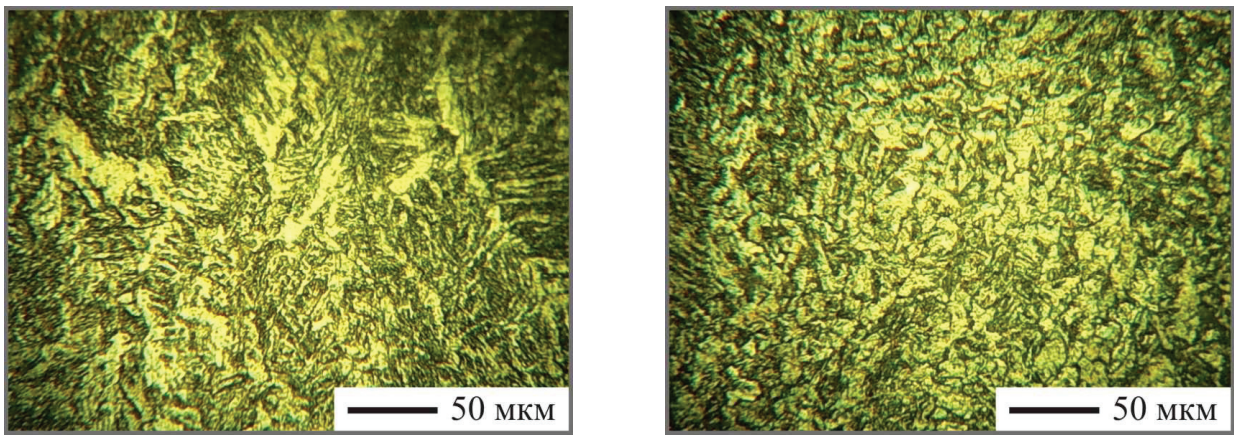
Изменения микроструктур являются следствием действия эффектов, возникающих в расплавленном металле, при введении в него ультразвуковых колебаний. К явлениям, которые оказывают значительное влияние на кинетику процесса кристаллизации, относятся звуковое давление, кавитация и акустические течения.

Введение в систему колебаний увеличивает свободную энергию системы, которая характеризует переход компонентов расплава из жидкой фазы в твердую [28]. Общее изменение энергии Гиббса $\Delta G_{общ}$ в этом случае:

$$\Delta G_{общ} = S\sigma - V\Delta G + E_{уз},$$

где S – суммарная площадь поверхности кристаллов; σ – поверхностное натяжение между жидким металлом и кристаллом; V – объем зародыша; ΔG – разность энергий Гиббса металла в жидком и твердом состоянии; $E_{уз}$ – энергия введенных ультразвуковых колебаний.

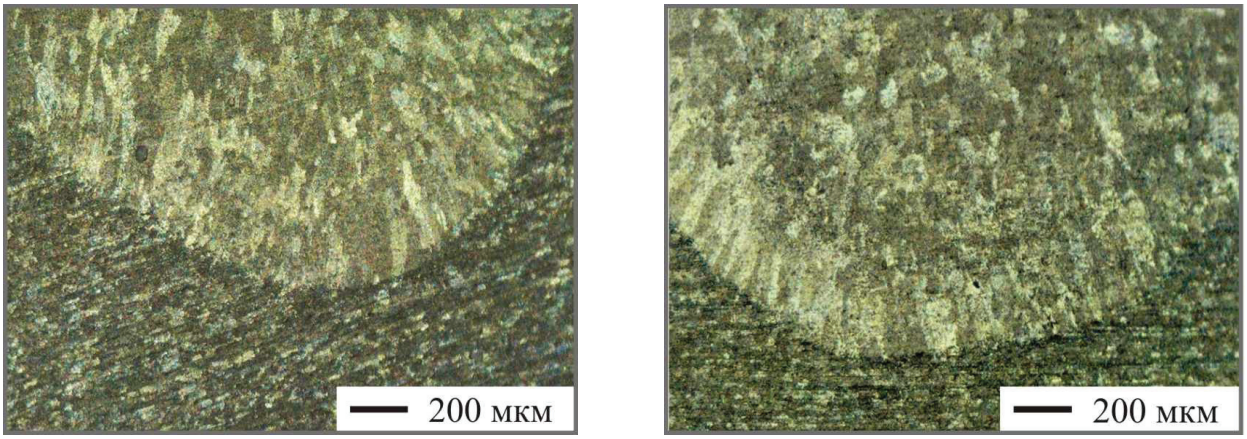
Под $E_{уз}$ следует понимать кинетическую энергию, сообщаемую образуемым зародышам кристаллизации:



а *б*

Рис. 6. Микроструктура металла шва стали Ст3, полученного:
а – без колебаний; *б* – с колебаниями

Fig. 6. Microstructures of the weld metal of steel St3:
a – without vibrations applied; *б* – with vibrations applied



а *б*

Рис. 7. Микроструктура зоны сплавления сплава АМг4, полученной:
а – без колебаний; *б* – с колебаниями

Fig. 7. Microstructures of the fusion zone of the AMg4 alloy:
a – without vibrations applied; *б* – with vibrations applied

$$E_{\text{уз}} = \frac{m(2\pi f)^2 \xi_m^2}{2},$$

где m – масса зародыша; f – частота колебаний; ξ_m – амплитуда колебаний.

В результате изменения энергетического баланса увеличивается работа, требуемая для образования устойчивого зародыша, что приводит к уменьшению температуры начала кристаллизации.

Наибольший эффект в формировании структуры при наложении колебаний имеет кавитация, заключающаяся в образовании, росте и последующем схлопывании пузырьков, что сопровождается повышением давлений и температур, мгновенные значения которых могут достигать нескольких сотен мегапаскалей (МПа) и нескольких тысяч градусов [29–37].

Возникающие при этом ударные волны и кумулятивные струи осуществляют диспергирование образованных зародышей. В первую очередь осуществляется дробление дендритов, так как они начинают расти первыми, и их рост происходит от границы сплавления, которая в данном

случае является поверхностью, излучающей колебания. Диспергированные части дендритов будут являться новыми зародышами кристаллизации, которые будут расти и затем дробиться под действием кавитации.

Акустические течения, возникающие в обрабатываемом расплаве, улучшают тепло- и массоперенос в расплаве до начала процесса кристаллизации. После дробления дендритов течения осуществляют распределение новых зародышей по ванне расплава, часть из которых попадет в зону активной кавитации и диспергируется еще раз.

За счет того, что все компоненты расплава, находящиеся как в жидкой, так и в твердой фазе, находятся в состоянии движения под действием вибраций, акустических течений, ударных волн и кумулятивных струй, создаются более сложные условия для присоединения атомов жидкой фазы к зародышам.

Схематично процесс кристаллизации сварного шва при наложении колебаний можно представить в виде, представленном на рис. 8.

Зона I: при охлаждении металла, кристаллизующегося без колебаний, до температуры ликвидуса $T_{лик}$ начинают расти первые дендриты. При наложении колебаний вследствие увеличения энергии Гиббса образование зародышей еще не началось. Действие кавитации и акустических потоков способствует равномерному перемешиванию компонентов расплава, находящихся в жидкой фазе.

Зона II: при дальнейшем охлаждении без колебаний продолжается рост дендритов и происходит образование новых. С колебаниями начинают образовываться дендриты. Вследствие особенностей распределения кавитационных пузырьков по озвучиваемому объему они в основном скапливаются в местах наибольших неровностей, которыми здесь является зона дендритов.

Зона III: без колебаний продолжается рост дендритов и начинается образование зародышей в остальном объеме ванны расплава. Схлопывание кавитационных пузырьков приводит к диспергированию дендритов, обломки которых переносятся акустическими течениями в глубь шва. Данные обломки являются зародышами кристаллизации и одновременно областями, притягивающими кавитационные пузырьки.

Зона IV: без колебаний продолжается рост дендритов, при этом растут не дендритные зародыши, и образуются новые. С ультразвуком вследствие охлаждения и связанного с ним увеличения вязкости расплава происходит снижение кавитационной активности, уменьшается количество пузырьков. Начинают расти дендриты, их обломки и образуются новые зародыши. При этом схлопывание пузырьков продолжает оказывать диспергирующее действие.

Далее: при продолжении роста дендритов и остальных зародышей без колебаний формируется окончательная структура шва. Действие

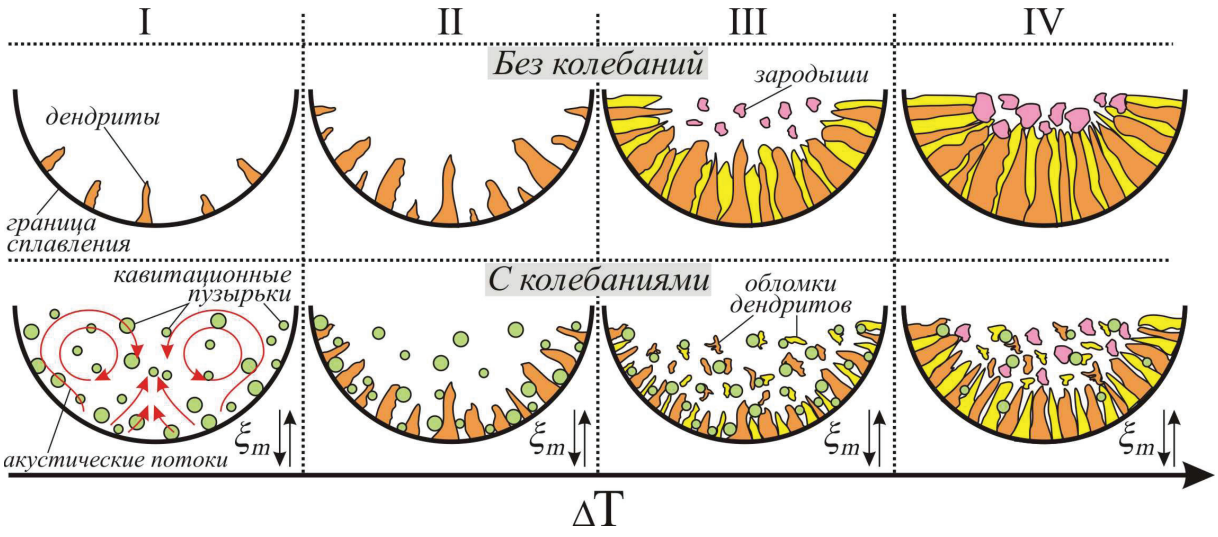


Рис. 8. Схема кристаллизации сварного шва

Fig. 8. Crystallization scheme of the weld

ультразвуковых эффектов при достижении расплавом высокой вязкости прекращается, образованные к этому моменту дендриты и зародыши растут до полного затвердевания.

Таким образом, введение ультразвуковых колебаний снижает температуру начала кристаллизации, увеличивает количество образуемых зародышей и уменьшает скорость их роста. В результате образуется мелкозернистая структура со значительным снижением доли дендритной ликвации.

Определение свойств сварного соединения

Полученные изменения микроструктуры приводят к повышению качества сварного соединения.

Так, сварной шов, полученный с наложением колебаний и обладающий равномерной структурой с уменьшением дендритной ликвации, имеет меньшую усадку в процессе остывания, что снижает сварочные деформации. Это выражается в уменьшении прогиба соединения (рис. 9).

а *б*

Рис. 9. Геометрические параметры сварного соединения АМг4:
а – без колебаний; *б* – с колебаниями

Fig. 9. Geometrical parameters of a welded joint made of AMg4 alloy:
a – without vibrations applied; *б* – with vibrations applied

При идентичных геометрических параметров валика шва угол, образованный между пластинами в результате усадки, снизился для соединения Ст3 1°45′ до 21′ и для АМг4 с 1°24′ до 10′. Таким образом, свариваемые с колебаниями элементы сохраняют параллельность, а без колебаний наклон одной пластины относительно другой будет составлять ≈2,5 мм на 100 мм длины, что особенно критично для протяженных сварных конструкций.

Испытания соединений на разрыв (рис. 10) также показывают повышение характеристик.

Наложение колебаний приводит к увеличению временного сопротивления на 5…10 %. Большее влияние ультразвук оказывает на пластичность металла шва, удлинение которого увеличивается на 13…22 %.

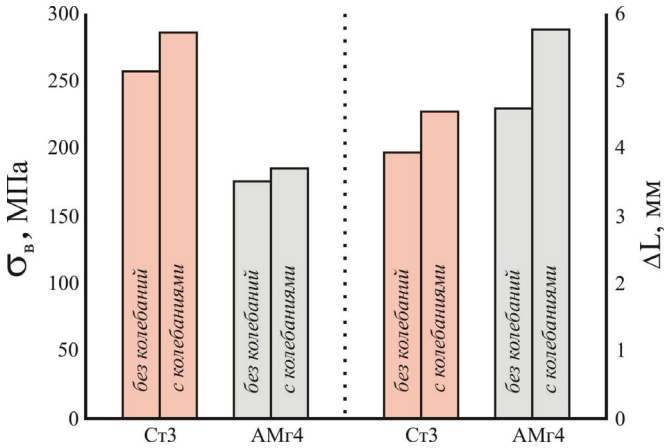


Рис. 10. Изменения временного сопротивления и удлинения образцов при испытании на растяжение

Fig. 10. Changes in tensile strength and elongation of specimens during the tensile testing

Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Оптимальным местом приложения ультразвуковых колебаний и наложения шва является один из максимумов амплитуды собственных изгибных колебаний свариваемой пластины. При этом длина сварного соединения выбирается исходя из условия равенства резонансной частоты

собственных колебаний частоте источника колебаний.

2. Характер колебаний пластины зависит от режима обработки, определяемого амплитудой колебаний. Наибольшая доля изгибных колебаний достигается при промежуточном режиме колебаний.

3. Наложение ультразвуковых колебаний приводит к изменению микроструктуры металла шва, что выражается в значительном снижении доли дендритной ликвации.

4. Введение ультразвуковых колебаний снижает температуру начала кристаллизации, увеличивает количество образуемых зародышей и уменьшает скорость их роста.

5. Механизм изменения микроструктуры заключается в диспергировании дендритов и зародышей кристаллизации при схлопывании кавитационных пузырьков. Обломки дендритов будут является новыми зародышами кристаллизации, которые распространяются по обрабатываемому объему под действием акустических потоков. Далее процесс повторяется.

6. У сварного соединения, полученного при наложении ультразвуковых колебаний, уменьшаются сварочные деформации, повышается временное сопротивление и пластичность.

Список литературы

1. *Wang H., Cen S.* Research on microstructure and mechanical properties of CMT and MIG welded joints of A6N01 aluminum alloy // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2185, iss. 1. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1742-6596/2185/1/012051.

2. *Sundukov S.K., Nigmetzyanov R.I., Fatyukhin D.S.* Structure of the weld formed during the application of ultrasonic vibrations // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – Vol. 13. – P. 1667–1672. – DOI: 10.1134/S0036029521130309.

3. Improvement of operational properties of parts permanent joints with ultrasound technologies use / V. Prikhodko, M. Karelina, S. Sundukov, A. Sukhodolya, V. Moiseev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1353, iss. 1. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012081.

4. Повышение эксплуатационных свойств сварных швов ультразвуковыми методами / Н.В. Бабченко, О.В. Селиверстова, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – № 1 (36). – С. 44–49.

5. *Bhadeshia H.K.D.H.* Problems in the welding of automotive alloys // Science and Technology of Welding and Joining. – 2015. – Vol. 20, iss. 6. – P. 451–453. – DOI: 10.1179/15Z.000000000379.

6. *Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е.* Металловедение сварки алюминия и его сплавов. – Киев: Наукова думка, 1992. – 158 с. – ISBN 5-12-002022-4.

7. *Xiao R., Zhang X.* Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys // Journal of Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 16, iss. 2. – P. 166–175. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.10.005.

8. *Statnikov E.S., Muktepavel V.O.* Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures // Welding International. – 2003. – Vol. 17, iss. 9. – P. 741–744. – DOI: 10.1533/wint.2003.3192.

9. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под общ. ред. В.О. Абрамова и В.М. Приходько. – М.: Янус-К, 2006. – 688 с. – ISBN 5-8037-0314-1.

10. Influence of ultrasound on submicrostructure of weld seam / S.K. Sundukov, R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhod'ko, A.V. Sukhov, D.S. Fatyukhin // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, iss. 6. – P. 570–573. – DOI: 10.3103/S1068798X21060228.

11. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al–5Ti–1B master alloy on aluminium / Y. Han, K. Li, J. Wang, D. Shu, B. Sun // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 405, iss. 1–2. – P. 306–312. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.06.024.

12. Thermal melt processing of metallic alloys / U. Dahlborg, M. Calvo-Dahlborg, D.G. Eskin, P.S. Popel // Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields. – Cham: Springer, 2018. – P. 277–315. – DOI: 10.1007/978-3-319-94842-3_8.

13. Патент № 515608 СССР. Способ ручной электродуговой сварки / Статников Е.Ш., Шевцов Е.М., Меркель М.С., Казанцев В.Ф. – № 2022257/27; заявл. 13.05.1974; опубл. 30.05.1976, Бюл. № 20.

14. Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding / C. Chen, C. Fan, X. Cai, S. Lin, Z. Liu, Q. Fan, C. Yang // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 46. – P. 241–247. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.09.014.

15. Process stability of ultrasonic-wave-assisted gas metal arc welding / C. Fan, W. Xie, C. Yang, S. Lin, Y. Fan // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2017. – Vol. 48, iss. 10. – P. 4615–4621. – DOI: 10.1007/s11661-017-4226-3.

16. *Cui Y., Xu C., Han Q.* Microstructure Improvement in weld metal under the ultrasonic application //

Advanced Engineering Materials. – 2007. – Vol. 9, iss. 3. – P. 161–163 – DOI: 10.1002/adem.200600228.

17. Effect of acoustic field parameters on arc acoustic binding during ultrasonic wave-assisted arc welding / W. Xie, C. Fan, C. Yang, S. Lin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 476–484. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.11.001.

18. *Eskin G.I.* Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – Vol. 8, iss. 3. – P. 319–325. – DOI: 10.1016/S1350-4177(00)00074-2.

19. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel / H. Dong, L. Yang, C. Dong, S. Kou // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 534. – P. 424–435. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.090.

20. Characteristics of periodic ultrasonic assisted TIG welding for 2219 aluminum alloys / X. Cai, S. Lin, X. Wang, C. Yang, C. Fan // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 24. – P. 4081. – DOI: 10.3390/ma12244081.

21. Microstructure evolutions and properties of Al–Cu alloy joint in the pulsed power ultrasonic-assisted GMAW / C. Chen, C. Fan, Z. Liu, X. Cai, S. Lin, Y. Zhuo // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2020. – Vol. 33, iss. 10. – P. 1397–1406. – DOI: 10.1007/s40195-020-01066-4.

22. Effect of ultrasound on heterogeneous nucleation in TIG welding of Al–Li alloy / Q.-H. Chen, S.-B. Lin, C.-L. Yang, C.-L. Fan, H.-L. Ge // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2016. – Vol. 29, iss. 12. – P. 1081–1088. – DOI: 10.1007/s40195-016-0483-1.

23. *Cunha T.V. da, Bohórquez C.E.N.* Ultrasound in arc welding: a review // Ultrasonics. – 2015. – Vol. 56. – P. 201–209. – DOI: 10.1016/j.ultras.2014.10.007.

24. *Сундуков С.К., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С.* Ультразвуковые технологии при получении неразъемных соединений. Обзор. Ч. 2 // Технология металлов. – 2021. – № 9. – С. 2–8. – DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-9-2-8.

25. *Rusinko A.* Analytical description of ultrasonic hardening and softening // Ultrasonics. – 2011. – Vol. 51, iss. 6. – P. 709–714. – DOI: 10.1016/j.ultras.2011.02.003.

26. Выбор и оптимизация режимов ультразвукового поверхностного деформирования / В.Ф. Казанцев, Ю.М. Лужнов, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4. – С. 26–32.

27. Stress relaxation due to ultrasonic impact treatment on multi-pass welds / H. Gao, R.K. Dutta, R.M. Huizenga, M. Amirthalingam, M.J.M. Hermans, T. Buslaps, I.M. Richardson // Science and Technology of Welding and Joining. – 2014. – Vol. 19, iss. 6. – P. 505–513. – DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000219.

28. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с. – ISBN 5-06-001473-8.

29. *Розенберг Л.Д.* Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

30. *Rozenberg L.D.* On the physics of ultrasonic cleaning // Ultrasonic News. – 1960. – Vol. 4, iss. 4. – P. 16–20.

31. *Mason T.J.* Ultrasonic cleaning: An historical perspective // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 519–523. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.

32. *Nikitenko S.I., Pflieger R.* Toward a new paradigm for sonochemistry: short review on nonequilibrium plasma observations by means of MBSL spectroscopy in aqueous solutions // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 35. – P. 623–630. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.02.003.

33. Comparative study on the cavitation erosion and sliding wear of cold-sprayed Al/Al2O3 and Cu/Al2O3 coatings, and stainless steel, aluminium alloy, copper and brass / M. Szala, M. Walczak, L. Latka, M. Winnicki // Metals. – 2020. – Vol. 10, iss. 7. – P. 856. – DOI: 10.3390/met10070856.

34. *Nolting B.E., Neppiras E.A.* Cavitation produced by ultrasonics // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1950. – Vol. 63, iss. 9. – P. 674.

35. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, A.V. Sukhov, S.K. Sundukov // Metals. – 2022. – Vol. 12, iss. 1. – P. 138. – DOI: 10.3390/met12010138.

36. Modelling of cavitational erosion in the area of surfaces of smooth contact / V.M. Prikhodko, A.P. Buslaev, S.B. Norkin, M.V. Yashina // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – Vol. 8, iss. 1. – P. 59–67. – DOI: 10.1016/S1350-4177(99)00048-6.

37. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders / H. Lais, P.S. Lowe, T.-H. Gan, L.C. Wrobel // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – Vol. 45. – P. 7–16. – DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.045.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 50–66
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process

Sergey Sundukov *

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

https://orcid.org/0000-0003-4393-4471, sergey-lefmo@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 25 March 2022
Revised: 13 May 2022
Accepted: 15 May 2022
Available online: 15 June 2022

Keywords:
Ultrasound
Welding
Vibrations
Cavitation
Microstructure
Dendritic segregation

Funding
This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number No. 21-79-00185, https://rscf.ru/project/21-79-00185/

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

ABSTRACT

Introduction. The main problem in obtaining welded joints is the nonuniform heating of the joint zone, which leads to differences in the structure and properties of the weld metal and the base metal. One of the ways to intensify the welding process is the use of ultrasonic vibrations. As a result of the analysis of methods for introducing ultrasonic vibrations into the melting zone, a method of superimposing vibrations on the elements to be welded was chosen for experimental studies. This method makes it possible to influence the welded elements throughout the entire welding cycle from the melt bath to complete crystallization of the metal. **Methods.** Experimental studies were carried out on plates made of carbon structural steel St3 (ASTM A568M, AISI 1017, DIN 17100) and aluminum deformable non-hardened alloy AMg4 (EN AW-5086, AW-AL Mg4, 5086). As a source of oscillations, a rod magnetostrictive oscillatory system was used, the end of which was rigidly fixed on one of the welded plates. To determine the places of application of the oscillation source and the welding zone, a calculation method is proposed based on the equality of the resonant frequencies of the used oscillatory system and the natural frequency of bending vibrations of the welding component. It is shown that the optimal places for the application of vibrations and welding will be the antinodes of oscillations, which have the maximum amplitude. Welds were obtained by the method of semi-automatic gas metal arc welding. **Results and Discussion.** Microstructural study of obtained samples showed a significant decrease in the proportion of dendritic segregation. The changes in the structure are the result of the effects that occur in the liquid melt when ultrasonic vibrations are introduced. The main effects are sound pressure, cavitation and acoustical streaming. The structure change mechanism consists in the dispersion of growing dendrites and crystallization nuclei under the action of shock waves and cumulative jets that occur when cavitation bubbles collapse. The formed fragments of dendrites are new crystallization nuclei that propagate through the melt pool under the action of acoustic currents. Then the process is repeated. The resulting effects affect the kinetics of the crystallization process – the degree of supercooling increases, the number of crystallization nuclei formed per unit time increases, and the rate of its growth decreases. Changes in the structure of the weld metal lead to an increase in the quality of the welded joint, which reduces welding deformations, increases the tensile strength and significantly increases ductility.

For citation: Sundukov S.K. Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 50–66. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66. (In Russian).

References

1. Wang H., Cen S. Research on microstructure and mechanical properties of CMT and MIG welded joints of A6N01 aluminum alloy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2185, iss. 1, p. 012051. DOI: 10.1088/1742-6596/2185/1/012051.

2. Sundukov S.K., Nigmetzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Structure of the weld formed during the application of ultrasonic vibrations. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 13, pp. 1667–1672. DOI: 10.1134/S0036029521130309.

*** Corresponding author**
Sundukov Sergey K., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Moscow Automobile and Road Construction State
Technical University (MADI)
64 Leningradsky prospect,
125319, Moscow, Russian Federation
Tel.: 8 (926) 369-19-70, **e-mail:** sergey-lefmo@yandex.ru

3. Prikhodko V.M., Karelina M., Sundukov S., Sukhodolya A., Moiseev V. Improvement of operational properties of parts permanent joints with ultrasound technologies use. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1353, iss. 1, p. 012081. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012081.

4. Babchenko N.V., Seliverstova O.V., Sundukov S.K., Fatyuhin D.S. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoistv svarnykh shvov ul'trazvukovymi metodami [Improving operational properties weld the ultrasonic method]. *Vestnik moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2014, no. 1 (36), pp. 44–49. (In Russian).

5. Bhadeshia H.K.D.H. Problems in the welding of automotive alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, vol. 20, iss. 6, pp. 451–453. DOI: 10.1179/15Z.000000000379.

6. Rabkin D.M., Lozovskaya A.V., Sklabinskaya I.E. *Metallovedenie svarki alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys welding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 158 p. ISBN 5-12-002022-4.

7. Xiao R., Zhang X. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, vol. 16, iss. 2, pp. 166–175. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.10.005.

8. Statnikov E.Sh., Muktepavel V.O. Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures. *Welding International*, 2003, vol. 17, iss. 9, pp. 741–744. DOI: 10.1533/wint.2003.3192.

9. Abramov V.O., Prikhod'ko V.M., eds. *Moshchnyi ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroenii* [Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering]. Moscow, Yanus-K Publ., 2006. 688 p. ISBN 5-8037-0314-1.

10. Sundukov S.K., Nigmetzyanov R.I., Prikhod'ko V.M., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Influence of ultrasound on submicrostructure of weld seam. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, iss. 6, pp. 570–573. DOI: 10.3103/S1068798X21060228.

11. Han Y., Li K., Wang J., Shu D., Sun B. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al–5Ti–1B master alloy on aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 405, iss. 1–2, pp. 306–312. DOI: 10.1016/j.msea.2005.06.024.

12. Dahlborg U., Calvo-Dahlborg M., Eskin D.G., Popel P.S. Thermal melt processing of metallic alloys. *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Cham, Springer, 2018, pp. 277–315. DOI: 10.1007/978-3-319-94842-3_8.

13. Statnikov E.Sh., Shevtsov E.M., Merkel M.S., Kazantsev V.F. *Sposob ruchnoi elektrodugovoi svarki* [Method of manual electric arc welding]. Patent USSR, no. 515608, 1976.

14. Chen C, Fan C., Cai X., Lin S., Liu Z., Fan Q., Yang C. Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 46, pp. 241–247. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.09.014.

15. Fan C., Xie W., Yang C., Lin S., Fan Y. Process stability of ultrasonic-wave-assisted gas metal arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48, iss. 10, pp. 4615–4621. DOI: 10.1007/s11661-017-4226-3.

16. Cui Y., Xu C., Han Q. Microstructure improvement in weld metal under the ultrasonic application. *Advanced Engineering Materials*, 2007, vol. 9, iss. 3, pp. 161–163. DOI: 10.1002/adem.200600228.

17. Xie W., Fan C., Yang C., Lin S. Effect of acoustic field parameters on arc acoustic binding during ultrasonic wave-assisted arc welding. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 476–484. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.11.001.

18. Eskin G.I. Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, iss. 3, pp. 319–325. DOI: 10.1016/S1350-4177(00)00074-2.

19. Dong H., Yang L., Dong C., Kou S. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 534, pp. 424–435. DOI: 10.1016/j.msea.2011.11.090.

20. Cai X., Lin S., Wang X., Yang C., Fan C. Characteristics of periodic ultrasonic assisted TIG welding for 2219 aluminum alloys. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 24, p. 4081. DOI: 10.3390/ma12244081.

21. Chen C., Fan C., Liu Z., Cai X., Lin S., Zhuo Y. Microstructure evolutions and properties of Al–Cu alloy joint in the pulsed power ultrasonic-assisted GMAW. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, vol. 33, iss. 10, pp. 1397–1406. DOI: 10.1007/s40195-020-01066-4.

22. Chen Q.-H., Lin S.-B., Yang C.-L., Fan C.-L., Ge H.-L. Effect of ultrasound on heterogeneous nucleation in TIG welding of Al–Li alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2016, vol. 29, iss. 12, pp. 1081–1088. DOI: 10.1007/s40195-016-0483-1.

23. Cunha T.V. da, Bohórquez C.E.N. Ultrasound in arc welding: a review. *Ultrasonics*, 2015, vol. 56, pp. 201–209. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.10.007.

24. Sundukov S.K., Nigmetzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Ul'trazvukovye tekhnologii pri poluchenii neraz"emnykh soedinenii. Obzor. Ch. 2 [Ultrasonic technologies in the production of permanent joints. Review. Pt. 2]. *Tekhnologiya metallov = Metall Technology*, 2021, vol. 9, pp. 2–8. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-9-2-8.

25. Rusinko A. Analytical description of ultrasonic hardening and softening. *Ultrasonics*, 2011, vol. 51, iss. 6, pp. 709–714. DOI: 10.1016/j.ultras.2011.02.003.

26. Kazantsev V.F., Luzhnov Yu.M., Nigmetzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Vybor i optimizatsiya rezhimov ul'trazvukovogo poverkhnostnogo deformirovaniya [Selection and optimization of ultrasonic surface deformation]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2016, no. 4, pp. 26–32. (In Russian).

27. Gao H., Dutta R.K., Huizenga R.M., Amirthalingam M., Hermans M.J.M., Buslaps T., Richardson I.M. Stress relaxation due to ultrasonic impact treatment on multi-pass welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, vol. 19, iss. 6, pp. 505–513. DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000219.

28. Frolov V.V., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 559 p. ISBN 5-06-001473-8.

29. Rosenberg L.D. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. T. 3. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physics and technology of powerful ultrasound. Vol. 3. Physical foundations of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 689 p.

30. Rozenberg L.D. On the physics of ultrasonic cleaning. *Ultrasonic News*, 1960, vol. 4, iss. 4, pp. 16–20.

31. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 519–523. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.05.004.

32. Nikitenko S.I., Pflieger R.. Toward a new paradigm for sonochemistry: short review on nonequilibrium plasma observations by means of MBSL spectroscopy in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 35, pp. 623–630. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.02.003.

33. Szala M., Walczak M., Latka L., Winnicki M. Comparative study on the cavitation erosion and sliding wear of cold-sprayed Al/Al2O3 and Cu/Al2O3 coatings, and stainless steel, aluminium alloy, copper and brass. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 7, p. 856. DOI: 10.3390/met10070856.

34. Nolting B.E., Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonics. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1950, vol. 63, iss. 9, p. 674.

35. Fatyukhin D.S., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels. *Metals*, 2022, vol. 12, iss. 1, p. 138. DOI: 10.3390/met12010138.

36. Prikhodko V.M., Buslaev A.P., Norkin S.B., Yashina M.V. Modelling of cavitational erosion in the area of surfaces of smooth contact. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, iss. 1, pp. 59–67. DOI: 10.1016/S1350-4177(99)00048-6.

37. Lais H., Lowe P.S., Gan T.-H., Wrobel L.C. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 45, pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.045.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

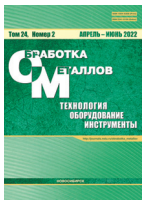
© 2022 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2022 Том 24 № 2 с. 67–77
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-67-77

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



К вопросу об ограничении неравномерности движения технологической машины в заданных пределах

Юрий Подгорный [1, 2, a, *], *Татьяна Мартынова* [1, b], *Вадим Скиба* [1, c]

[1] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[2] Новосибирский технологический институт, филиал Московского государственного университета дизайна и технологии, Красный пр., 35 (ул. Потанинская, 5), г. Новосибирск, 630099, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-1664-5351, pjui@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-5811-5519, martynova@corp.nstu.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.8, 519.6:539.3

История статьи:
Поступила: 14 марта 2022
Рецензирование: 25 апреля 2022
Принята к печати: 15 мая 2022
Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:
Технологическая машина
Коэффициент неравномерности
Движущий момент
Момент сил сопротивления
Момент от сил инерции
Технологическая нагрузка

Финансирование:
Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_22.

Благодарности:
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).

АННОТАЦИЯ

Введение. Задача регулирования колебаний скоростей для любого механизма имеет существенное значение, так как временной интервал этого движения является рабочим временем, в течение которого выполняется основная технологическая операция. В этом случае может возникнуть вопрос о регулировании скоростей движения как во время разгона, холостого хода машины, так и во время выполнения основной технологической операции. Основным качественным показателем удовлетворительной работы любой машины является коэффициент неравномерности движения, величина которого зависит от отношения максимальной, минимальной и средней скорости движения вала приведения. Особенно остро ставится задача определения коэффициента неравномерности движения машины с учетом характеристики двигателя. В этом случае машину рассматривают как систему, состоящую из одной массы. Упругостью элементов, входящих в машину, пренебрегают. Анализ научной литературы по данному направлению указывает на то, что вопросам исследования неравномерности вращения и ее влияния на динамику механизмов уделено недостаточно внимания, особенного это касается решения уравнений с учетом характеристики двигателя**. Целью данной работы** является разработка методики, позволяющей определять и регулировать неравномерность вращения вала приведения с учетом характеристики двигателя, сил полезного сопротивления и инерции масс механизма. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единой методики, позволяющей регулировать неравномерность вращения вала приведения на стадии проектирования механизмов подобного типа. **Теория и методы.** Для определения уравнения движения машины в дифференциальной форме предлагается использовать уравнение Лагранжа второго рода. Математическое моделирование проводилось с использованием пакетов прикладных программ *Mathcad* и КОМПАС-3D. **Результаты и обсуждение.** Представлена методика, позволяющая регулировать неравномерность вращения вала. Для определения величины коэффициента неравномерности средствами CAE системы *Mathcad* определены его значения, а также выявлены закономерности изменения данных показателей при суммарных значениях эксплуатации, находящихся в пределах 22…46 Н·м. Анализ результатов проведенных расчетов указывает на то, что коэффициент неравномерности вращения вала приведения составляет 0,101. Предусмотрена возможность изменения этого коэффициента за счет коррекции приведенного момента инерции введением дополнительного маховика или изменением вращающего момента вала электродвигателя. Полученные результаты исследований позволили выработать конкретные рекомендации по модернизации конструкций приводов машин, предназначенных для перемешивания сыпучих материалов, и наметить пути дальнейших исследований в этом направлении.

Для цитирования: *Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю.* К вопросу об ограничении неравномерности движения технологической машины в заданных пределах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 67–77. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-67-77.

Введение

Неравномерность движения является одной из основных задач динамики механизмов, определение значений которой позволяет выбрать рациональные соотношения между действующими внешними силами, инерционными составляющими механизма и их скоростями. Неравно-

***Адрес для переписки**
Подгорный Юрий Ильич, д.т.н., профессор
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
г. Новосибирск, 630073, Россия
Тел.:+7 (383) 346-17-79, **e-mail:** pjui@mail.ru

мерность движения вала приведения машины (главного вала) возникает при непостоянстве создаваемого двигателем момента или переменности момента полезных сопротивлений [1 – 11].

Все больший интерес в практике проектирования машин для перемешивания сыпучих материалов уделяется приводам с неравномерным движением рабочего органа. Это обусловлено тем, что в данном случае обеспечивается укорачивание всей кинематической цепи привода, и одновременно с этим происходит улучшение качества перемешиваемого продукта вследствие ликвидации мертвых зон при перемешивании указанного вида продукта [4–7, 9, 10, 12–20]. Задача о регулировании колебаний скоростей для любого механизма имеет существенное значение, так как временной интервал этого движения является рабочим временем, в течение которого выполняется основная технологическая операция – перемешивание сыпучего продукта [21–23]. В этом случае может возникнуть вопрос о регулировании скоростей движения как во время холостого хода машины, так и во время выполнения основной технологической операции. Структура устройства может включать в себя различные виды механизмов, в том числе рычажного типа, кулачковых, зубчатых, а также кулачково-зубчато-рычажных, механизмов с эллиптическими колесами, дифференциальных и др.

В данной статье авторы предлагают конструкцию устройства, в приводе которого предусмотрена планетарная передача. Применение такого привода позволит увеличить производительность оборудования, его технико-экономическую эффективность, что, в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности вновь проектируемых машин. При синтезе механизмов такого типа на стадии проектирования приводов необходимо знать амплитуды колебаний скоростей приводного вала как за время разгона этой машины, так и во время установившегося движения [24–27]. Выявление закономерностей изменения скоростей вала приведения позволит определять коэффициенты неравномерности его вращения и активно внедряться в процесс проектирования машины, производя его регулирование с помощью рационального размещения инерционно-массовых составляющих проектируемого изделия и правильно задавая величину и закономерность изменения технологической нагрузки. Анализ научной литературы по данному направлению указывает на то, что вопросам исследования неравномерности вращения и ее влияния на динамику механизмов уделено недостаточно внимания, особенного это касается решения уравнений с учетом характеристики двигателя [1–10, 12, 14, 15, 17–22, 24–27].

Регулирование работы приводных устройств машин для перемешивания сыпучих материалов между притоком энергии и ее расходом для преодоления внешних сопротивлений может иметь разные цели, в том числе и сохранение определенной производительности [24–27].

При определении моментов инерции маховых масс (маховиков) при заданной наибольшей неравномерности хода машины обычно пользуются графоаналитическими методами в связи с тем, что трудно аналитически выразить механические характеристики двигателя [6–10, 14–17]. Обычно движущие моменты задают в виде произвольной функции угла поворота или принимают их значения в виде постоянной величины. В этом случае отсутствует возможность учесть обратную связь, т. е. влияние величины внешнего сопротивления на скорость движения ведущего звена и, как следствие, на величину неравномерности движения вала приведения [16–22, 23–27].

Приведенные моменты инерции машины могут быть постоянными или зависящими от положения ведущего звена. Для широкого класса механизмов машин основные силовые и кинематические характеристики зависят от функций положения ведущего звена [1 – 11], в том числе и в рассматриваемом случае. В большинстве задач кинематического анализа механизмов предполагается, что ведущее звено движется с постоянной скоростью. Однако такое предположение можно отнести только к механизмам, имеющим постоянный момент инерции (приведенный). Сложнее дело обстоит с приведенными силами инерции. Они практически могут быть постоянными только для тел, имеющих координаты центров на оси вращения [5 – 14, 17 – 20].

Целью данной работы является разработка методики, позволяющей определять и регулировать неравномерность вращения вала приведения с учетом характеристики двигателя, сил

полезного сопротивления и инерции масс механизма.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием единой методики, позволяющей регулировать неравномерность вращения вала приведения на стадии проектирования механизмов подобного типа.

Теория и методы

Предполагается рассмотреть приведенную модель механизма на примере пищевой машины, предназначенной для перемешивания сыпучего материала, у которой моменты от сил сопротивления, сил инерции и моменты инерции масс зависят от угла поворота ведущего звена (вала приведения), а в приводе предусмотрен асинхронный электрический двигатель (см. схему, представленную на рис. 1). Разработка математической модели осуществлялась средствами программного продукта *Mathcad* при непосредственном использовании системы автоматизированного проектирования Компас 3D.

Характер изменения технологической нагрузки, действующей на рабочие валы устройства, показан ранее в работе [25]. В настоящей работе представлены только значения и характер приведенных моментов этих сил к главному валу устройства. В нашем случае они представлены в виде выражения $M_c(\varphi) = 24 + 12\cos(2/16\varphi)$, а момент движущих сил – в виде параболы

$$M_d = A\left(\frac{d\varphi^2}{dt} + B\right), \quad \text{где} \quad A = -\frac{M_m}{\omega_0^2 - \omega_m^2};$$

$$B = -\frac{M_m\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega_m^2}.$$

Максимальное значение суммарного момента сил полезного сопротивления и момента от сил инерции составило 46 Н·м, минимальное – 22 Н·м, они зависят от угла разворота лопаток месильных валов.

Принцип работы устройства подробно изложен в [24–27]. В настоящей работе приводится математическая модель устройства, где введены следующие обозначения: момент инерции ротора обозначен как J_{EM}; момент инерции шкива ведущего – J_1; момент инерции шкива ведомого – J_2; моменты инерции шестерен – J_3, J_4, J_5, J_6, J_8, J_9, J_{10}, J_{11}, момент инерции водила – J_7. Валы, передающие движение от двигателя к рабочим валам, обозначены – *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*.

Предлагается определять уравнение движения машины, используя уравнение Лагранжа второго рода, которое в нашем случае будет иметь следующий вид:

$$J\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{1}{2}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\frac{dJ}{d\varphi} = M_d - M_c, \qquad (1)$$

где J – приведенный момент инерции; φ – обобщенные координаты системы; M_d – движущий момент; M_c – момент сопротивления.

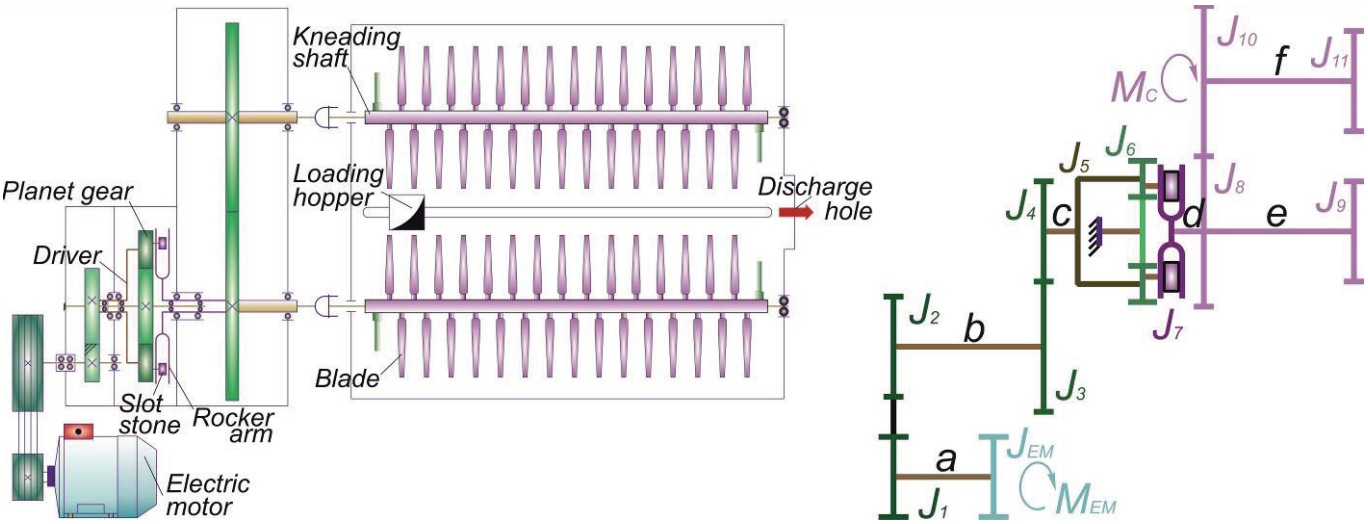


Рис. 1. Кинематическая схема и математическая модель конструкции машины, включающей эпициклическую передачу

Fig. 1. Kinematic diagram and mathematical model of the kneader design that includes an epicyclic gearing

Момент движущих сил определяется формулой

$$M_d = \frac{2M_m}{\frac{\sigma}{\sigma_m} + \frac{\sigma_m}{\sigma}}, \qquad (2)$$

где J – приведенный момент инерции; σ – скольжение, соответствующее значению M_d; σ_m – скольжение, соответствующее значению M_m; M_m – максимальный (опрокидывающий момент).

В формуле (1) величину M_d заменим выражением, описывающим параболу, тогда получим

$$M_d = A\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + B, \qquad (3)$$

где

$$A = -\frac{M_m}{\omega_0^2 - \omega_m^2}; \qquad B = -\frac{M_m\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega_m^2}, \qquad (4)$$

здесь ω_0 и ω_m – угловые скорости приведенной массы системы, соответствующие $M_d = 0$ и $M_d = M_m$.

Тогда выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$J\frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2}\omega^2\frac{dJ}{d\phi} = A\omega^2 + B - M_c, \qquad (5)$$

где $\frac{d\varphi}{dt} = \omega$.

Разделив все члены уравнения (5) на $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ и преобразовав его, получим:

$$\frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{\left(\frac{1}{2}\frac{dJ}{d\varphi} - A\right)\omega}{J} + \frac{M_c - B}{J\omega} = 0. \qquad (6)$$

Заменим $\omega^2 = u$, получим:

$$\frac{du}{d\varphi} + 2uf(\varphi) = -2q(\varphi), \qquad (7)$$

где

$$f(\varphi) = \frac{\frac{1}{2}\frac{dJ}{d\varphi} - A}{J}; \qquad q(\varphi) = \frac{M_c - B}{J}.$$

При начальных условиях, когда $t = 0$ и $u = \omega_0^2$, решение имеет следующий вид:

$$\omega = \sqrt{e^{-2\int_0^\varphi f(\varphi)d\varphi} \times \left[\omega_0^2 - 2\int_0^\varphi q(\varphi)e^{2\int_0^\varphi f(\varphi)d\varphi}d\varphi\right]}. \qquad (8)$$

Для определения момента инерции маховика примем следующее допущение: $J = J_m + J_0 = \text{const}$, где J_m – приведенный момент инерции маховика; J_0 – приведенный момент инерции месильной машины.

Момент от сил сопротивления будем рассматривать в виде

$$M_c = M_1 + M_2 \sin n\varphi,$$

где M_1 – постоянная часть приведенного момента полезных сопротивлений; M_2 – максимальное значение переменной части момента; n – кратность переменной составляющей в пределах одного оборота.

Так как $J = \text{const}$, то

$$f(\varphi) = -\frac{A}{J}; \quad q(\varphi) = \frac{M_1 + M_2\sin n\varphi - B}{J}.$$

Тогда угловая скорость определится как

$$\omega = \sqrt{e^{2\int_0^\varphi -\frac{A}{J}d\varphi} \times \left[\omega_0^2 - 2\int_0^\varphi \frac{M_1 + M_2\sin n\varphi - B}{J}e^{-2\int_0^\varphi \frac{A}{J}d\varphi}d\varphi\right]}. \qquad (9)$$

Проинтегрировав выражения под знаком корня, получим:

$$\omega = \sqrt{\left(\omega_0^2 - \frac{D_2}{D_1} - \frac{2D_3 n}{4D_1^2 + n^2}\right)e^{-2D_1\varphi} + \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_2}{D_1} + \frac{2D_3\left(n\cos n\varphi - 2D_1\sin n\varphi\right)}{4D_1^2 + n^2}}, \qquad (10)$$

где

$$D_1 = \frac{M_m}{J\left(\omega_0^2 - \omega_m^2\right)};$$

$$D_2 = \frac{M_m\omega_0^2 - M_1\left(\omega_0^2 - \omega_m^2\right)}{J\left(\omega_0^2 - \omega_m^2\right)}; \quad D_3 = \frac{M_2}{J}.$$

Предположим, что установившееся движение наступает при φ, стремящемся к бесконечности, тогда выражение (10) примет вид

$$\omega = \sqrt{\frac{D_2}{D_1} + \frac{2D_3(n\cos n\varphi - 2D_1 \sin n\varphi)}{4D_1^2 + n^2}}, \quad (11)$$

откуда

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{D_2}{D_1} + \frac{2D_3}{\sqrt{4D_1^2 + n^2}}};$$

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{D_2}{D_1} - \frac{2D_3}{\sqrt{4D_1^2 + n^2}}}. \quad (12)$$

Полученные выражения (12) подставим в формулу для определения неравномерности движения вала приведения, которая представляет собой следующее выражение:

$$\delta = 2\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\max} + \omega_{\min}}. \quad (13)$$

Результаты и обсуждения

В связи с поставленной целью необходимо было определиться с основными характеристиками двигателя, в число которых для рассматриваемого случая входят: M_d – момент движущихся сил, M_m – максимальный (опрокидывпающий момент); угловые скорости ω_0 = 145 с$^{-1}$ и ω_m = = 36 с$^{-1}$, соответствующие M_d = 0 и $M_d = M_m$ = = 158 Н·м. Все эти параметры представлены в виде графика, изображенного на рис. 2, где сплошной линией показана характеристика двигателя, а штриховой – парабола, описываемая выражением (3), в котором *A* и *B* определены по условию прохождения параболы через начало координат и точку *O*, соответствующую пересечению параболы с кривой асинхронного двигателя.

Момент от сил полезных сопротивлений, приведенный к главному валу (валу приведения), представлен в виде графика, изображенного на рис. 3.

В соответствии с ранее полученными данными, представленными в [24–27], средний приведенный момент инерции всех масс машины к главному валу (валу приведения) составляет J = 0,323 кг·м^2. По формуле (11) расчитали значения скорости вращения вала приведения. Результаты расчетов показаны на рис. 4.

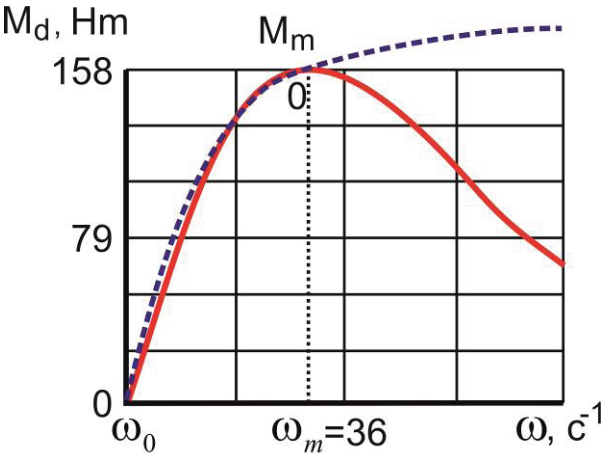


Рис. 2. График асинхронного двигателя и его особые точки

Fig. 2. Graph of an asynchronous motor and its special points

Для рассматриваемого случая неравномерность вращения вала приведения составила 0,085 при максималной скорости вращения, равной ω_{max} = 145·с$^{-1}$, и минимальной скороси ω_{min} = 133,2·с$^{-1}$.

Анализируя формулу (13) и зависимости для D_1, D_2 и D_3, приходим к заключению, что коэффициент неравномерности δ определяется отношением максимальной, минимальной и средней скорости вращения вала приведения. Скорости вращения, в свою очередь, зависят от величины приведенного момента инерции и движущего момента. В связи с этим нами были проведены исследования в части изменения неравномерности вращения от величины приведенного момента инерции и величины движущего момента. В первом случае изменение величины неравномерности движения представлены на рис. 5, а для второго случае – на рис. 6.

Выводы

Представлена методика определения коэффициента неравномерности вращения вала приведения машины, имеющей в приводе месильных валов эпициклическую передачу с кулисой, включающая:

– математическую модель механизма, позволяющую проводить расчет скорости движения вала приведения. Так, для рассматриваемого случая максимальная скорость составила

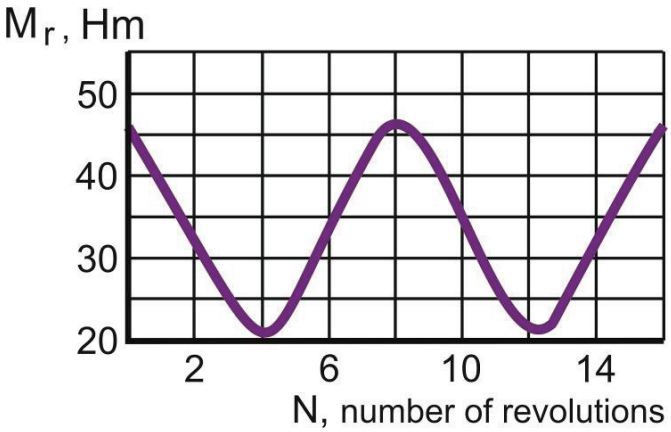


Рис. 3. Момент сопротивления, приведенный к главному валу (валу приведения)

Fig. 3. The moment of resistance, reduced to the main (modified) shaft

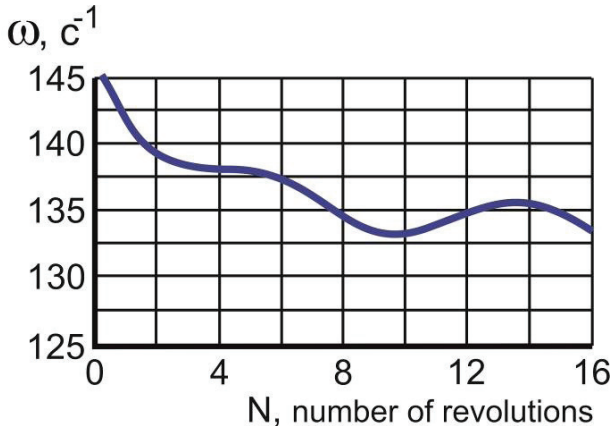


Рис. 4. Скорости в зависимости от оборотов вала приведения

Fig. 4. Speed depending on the revolutions of the drive shaft

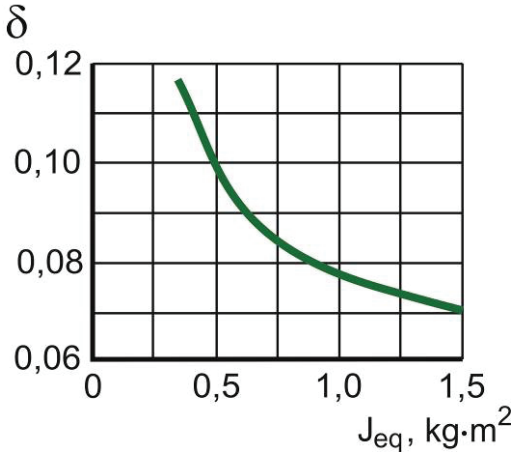


Рис. 5. График изменения величины неравномерности вращения от величины момента инерции массы

Fig. 5. A graph of the change in the value of the rotation irregularity depending on the mass moment of inertia

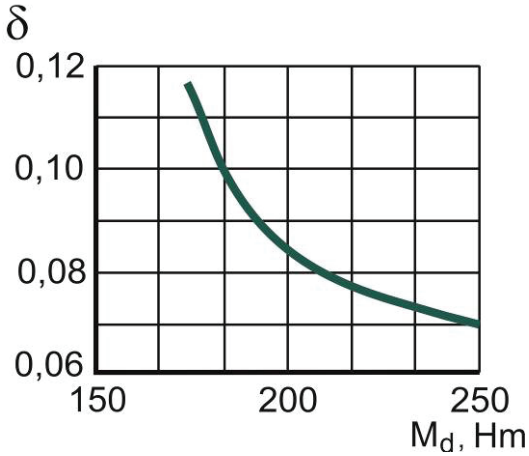


Рис. 6. График изменения величины неравномерности вращения от величины вращающего момента

Fig. 6. A graph of the change in the value of the rotation irregularity depending on the value of the torque

ω_{max} = 145 с$^{-1}$, а минимальная – ω_{min} = 133,2 с$^{-1}$. Коэффициент неравномерности вращения вала приведения δ = 0,101;

– намечена перспектива улучшения динамических характеристик машины путем изменения коэффициента неравномерности в сторону уменьшения за счет введения дополнительной маховой массы, размещенной на валу приведения. Так, введение дополнительного момента инерции массы до 0,177 кг·м^2 позволит довести значение неравномерности вращения вала приведения до 0,06, что соответствует требованиям, предъявляемым к этому типу машин;

– определен характер и величина изменения технологической и инерционной нагрузок, действующих на рабочие валы устройства, и представлены их значения и характер с учетом приведения к главному валу (валу приведения) машины;

– определена закономерность изменения моментов от сил инерции и технологического сопротивления, которое можно выразить следующей общей зависимостью:

$$M_c(\varphi) = 24 + 12\cos(2 / 16\varphi) \cdot$$

Список литературы

1. *Hsieh J.-F.* Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes // Mechanism and Machine Theory. – 2014. – Vol. 81. – P. 155–165. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.

2. *Eckhardt H.D.* Kinematic design of machines and mechanisms. – 1st ed. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 620 p. – ISBN 0070189536. – ISBN 978-0070189539.

3. *Myszka D.H.* Machines and mechanisms: applied kinematic analysis. – 4th ed. – Pearson, 2012. – 576 p. – ISBN 0-13-215780-2. – ISBN 978-0-13-215780-3.

4. *Rao J.S., Dukkipati R.V.* Mechanism and machine theory. – 2nd ed. – New Delhi: New Age International, 2008. – 600 p. – ISBN 812240426X. – ISBN 978-8122404265.

5. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review / B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, R. Wang // Mechanism and Machine Theory. – 2012. – Vol. 143. – P. 103622. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.

6. *Youssef H.A., El-Hofy H.* Machining technology: machine tools and operations. – Hoboken: Taylor & Francis Group, 2008. – 672 p. – ISBN 9781420043396.

7. *Shabana A.A.* Dynamic of multibody systems. – 4th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 393 p. – ISBN 978-1107042650. – ISBN 1107042658.

8. *Erdman A.G., Sandor G.N.* Mechanism design: analysis and synthesis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2001. – 688 p. – ISBN 0130408727. – ISBN 978-0130408723.

9. Advanced theory of mechanisms and machines / M.Z. Kolovsky, A.N. Evgrafov, Yu.A. Semenov, A.V. Slousch. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. – 396 p. – (Foundations of Engineering Mechanics). – ISBN 978-3-642-53672-4. – eISBN 978-3-540-46516-4. – DOI: 10.1007/978-3-540-46516-4.

10. *Astashev V.K., Babitsky V.I., Kolovsky M.Z.* Dynamics and control of machines. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. – 235 p. – ISBN 978-3-642-53698-4. – eISBN 978-3-540-69634-6. – DOI: 10.1007/978-3-540-69634-6.

11. *Hendrickson C.T., Janson B.N.* A common network flow formulation for several civil engineering problems // Civil Engineering Systems. – 1984. – Vol. 1, iss. 4. – P. 195–203. – DOI: 10.1080/02630258408970343.

12. *Battarra M., Mucchi E.* Analytical determination of the vane radial loads in balanced vane pumps // Mechanism and Machine Theory. – 2020. – Vol. 154. – P. 104037. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104037.

13. *Neugebauera R., Denkena B., Wegener K.* Mechatronic systems for machine tools // CIRP Annals. – 2007. – Vol. 56, iss. 2. – P. 657–686. – DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.007.

14. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series / C. Zhoua, B. Hua, S. Chenb, L. Mac // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Vol. 104. – P. 118–129. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

15. Robust design optimization of the vibrating rotor-shaft system subjected to selected dynamic constraints / R. Stocki, T. Szolc, P. Tauzowski, J. Knabel // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2012. – Vol. 29. – P. 34–44. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.07.023.

16. A semi-analytical load distribution model for cycloid drives with tooth profile and longitudinal modifications / T. Zhang, X. Li, Y. Wang, L. Sun // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 14. – P. 4859. – DOI: 10.3390/app10144859.

17. *Xu L.X., Chen B.K., Li C.Y.* Dynamic modelling and contact analysis of bearing-cycloid-pinwheel transmission mechanisms used in joint rotate vector reducers // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – Vol. 137. – P. 432–458. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.035.

18. Theoretical analysis of compliance and dynamics quality of a lightly loaded aerostatic journal bearing with elastic orifices / V. Kodnyanko, S. Shatokhin, A. Kurzakov, Y. Pikalov // Precision Engineering. – 2021. – Vol. 68. – P. 72–81. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.11.012.

19. *Mott R.L.* Machine elements in mechanical design. – 5th ed. – Pearson, 2013. – 816 p. – ISBN 0135077931. – ISBN 978-0135077931.

20. *Novotný P., Jonák M., Vacula J.* Evolutionary optimisation of the thrust bearing considering multiple operating conditions in turbomachinery // International Journal of Mechanical Sciences. – 2021. – Vol. 195. – P. 106240. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106240.

21. A practical approach to motion control for varying inertia systems / T. Kaipio, L. Smelov, C. Morgan, N. Leighton // Progress in system and robot analysis and control design / ed. by S.G. Tzafestas, G. Schmidt. – London: Springer, 1999. – P. 195–204. – (Lecture Notes in Control and Information Sciences; vol. 243). – DOI: 10.1007/BFb0110545.

22. *Vulfson I.* Dynamics of cyclic machines. – Cham: Springer International, 2015. – 390 p. – (Foundations of Engineering Mechanics). – ISBN 978-3-319-12633-3. – eISBN 978-3-319-12634-0. – DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

23. Graph-based modelling in engineering / ed. by S. Zawislak, J. Rysinski. – Switzerland: Springer International, 2017. – 247 p. – (Mechanisms and Machine Science; vol. 42). – ISBN 978-3-319-39018-5. – eISBN 978-3-319-39020-8. – DOI: 10.1007/978-3-319-39020-8.

24. Synthesis of irregular motion mechanisms for production machine drives / T.G. Martynova, V.Yu. Skeeba, Yu.I. Podgornyj, D.V. Lobanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 843. – P. 012006. – DOI: 10.1088/1757-899X/843/1/012006.

25. Experimental determination of useful resistance value during pasta dough kneading / Yu.I. Podgornyj, T.G. Martynova, V.Yu. Skeeba, A.S. Kosilov, A.A. Chernysheva, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87, iss. 8. – P. 082039. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082039.

26. Методика уравновешивания роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, Д.В. Лобанов, А.А. Жирова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 41–50. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50.

27. Algorithm for determining the unbalances of continuous mixers rotors / Yu.I. Podgornyj, T.G. Martynova, V.Yu. Skeeba, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1061. – P. 012071. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012071.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 67–77
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-67-77

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

On the issue of limiting the irregular motion of a technological machine within specified limits

Yuriy Podgornyj [1, 2, a, *], *Tatyana Martynova* [1, b], *Vadim Skeeba* [1, c]

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2] Novosibirsk Technological Institute (branch) Moscow State University of Design and Technology, 35 Krasny prospect (5 Potaninskayast.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-1664-5351, pjui@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-5811-5519, martynova@corp.nstu.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 14 March 2022
Revised: 25 April 2022
Accepted: 15 May 2022
Available online: 15 June 2022

Keywords:
Production machine
Irregularity ratio
Drive moment
Moment of resistance
Moment of inertia
Process load

Funding
This study was supported by a NSTU grant (project No. TP-PTM-1_22).

Acknowledgements
Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials" (agreement with the Ministry of Education and Science No. 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).

ABSTRACT

Introduction. The problem of regulating speed fluctuations for any mechanism is essential, because the time interval of this movement is the working time during which the main technological operation is performed. In this case, the question may arise about the regulation of motion speeds both during acceleration, idling of the machine, and during the execution of the main technological operation. The main qualitative indicator of the satisfactory operation of any machine is the motion irregularity ratio, the value of which depends on the ratio of the maximum, minimum and average speeds of the drive shaft. Particularly acute is the problem of determining the motion irregularity ratio of the machine, taking into account the characteristics of the motor. In this case, the machine is considered as a system consisting of a single mass. The elasticity of the elements included in the machine is neglected. An analysis of the scientific literature in this area indicates that insufficient attention is paid to the study of rotation irregularities and its influence on the dynamics of mechanisms, especially when it comes to solving equations taking into account the characteristics of the motor. **The purpose of this work** is to develop a methodology that allows determining and regulate the non-uniform rotation of the drive shaft, taking into account the characteristics of the motor, the forces of useful resistance and the inertia of the masses of the mechanism. The relevance of the study is due to the lack of a unified methodology that allows adjusting the non-uniform rotation of the drive shaft at the stage of designing mechanisms of this type. **Theory and methods**. It is proposed to use the *Lagrange equation of the second kind* to determine the equation of machine motion in differential form. Mathematical simulation is carried out using the *Mathcad* and *KOMPAS-3D* application packages. **Results and discussion**. A methodology is presented that makes it possible to regulate the non-uniform rotation of the shaft. The *CAE* of the *Mathcad* system are used to determine the value of the irregularity ratio and patterns of change in these indicators are identified for total operating values that are in the range of 22-46 Nm. An analysis of the results of the calculations performed indicates that the irregularity ratio of the drive shaft rotation is 0.101. It is possible to change this ratio by changing the reduced moment of inertia by installing an additional flywheel or changing the torque of the motor shaft. The obtained results of the research made it possible to develop specific recommendations for the modernization of the drive designs for machines for mixing bulk materials and to outline ways for further research in this direction.

For citation: Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu. On the issue of limiting the irregular motion of a technological machine within specified limits. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 67–77. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-67-77. (In Russian).

References

1. Hsieh J.-F. Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, vol. 81, pp. 155–165. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.

2. Eckhardt H.D. *Kinematic design of machines and mechanisms*. 1st ed. New York, McGraw-Hill, 1998. 620 p. ISBN: 0070189536. ISBN: 978-0070189539.

*** Corresponding author**
Podgornyj Yuriy I., D.Sc. (Engineering), Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel: +7 (383) 346-17-79, **e-mail:** pjui@mail.ru

3. Myszka D.H. *Machines and mechanisms: applied kinematic analysis*. 4th ed. Pearson, 2012. 576 p. ISBN: 0-13-215780-2. ISBN: 978-0-13-215780-3.

4. Rao J.S., Dukkipati R.V. *Mechanism and machine theory*. 2nd ed. New Delhi, New Age International, 2008. 600 p. ISBN: 812240426X. ISBN: 978-8122404265.

5. Zhu B., Zhang X., Zhang H., Liang J., Zang H., Li H., Wang R. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, vol. 143, p. 103622. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.

6. Youssef H.A., El-Hofy H. *Machining technology: machine tools and operations*. Hoboken, Taylor & Francis Group, 2008. 672 p. ISBN 9781420043396.

7. Shabana A.A. *Dynamic of multibody systems*. 4th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 393 p. ISBN: 978-1107042650. ISBN: 1107042658.

8. Erdman A.G., Sandor G.N. *Mechanism design: analysis and synthesis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2001. 688 p. ISBN: 0130408727. ISBN: 978-0130408723.

9. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. *Advanced theory of mechanisms and machines*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2000. 396 p. *Foundations of Engineering Mechanics*. ISBN: 978-3-642-53672-4. eISBN: 978-3-540-46516-4. DOI: 10.1007/978-3-540-46516-4.

10. Astashev V.K., Babitsky V.I., Kolovsky M.Z. *Dynamics and control of machines*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2000. 235 p. ISBN: 978-3-642-53698-4. eISBN: 978-3-540-69634-6. DOI: 10.1007/978-3-540-69634-6.

11. Hendrickson C.T., Janson B.N. A common network flow formulation for several civil engineering problems. *Civil Engineering Systems*, 1984, vol. 1, iss. 4, pp. 195–203. DOI: 10.1080/02630258408970343.

12. Battarra M., Mucchi E. Analytical determination of the vane radial loads in balanced vane pumps. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, vol. 154, p. 104037. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104037.

13. Neugebauera R., Denkena B., Wegener K. Mechatronic systems for machine tools. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56, iss. 2, pp. 657–686. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.007.

14. Zhoua C., Hua B., Chenb S., Mac L. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 104, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

15. Stocki R., Szolc T., Tauzowski P., Knabel J. Robust design optimization of the vibrating rotor-shaft system subjected to selected dynamic constraints. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 29, pp. 34–44. DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.07.023.

16. Zhang T., Li X., Wang Y., Sun L. A semi-analytical load distribution model for cycloid drives with tooth profile and longitudinal modifications. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 14, p. 4859. DOI: 10.3390/app10144859.

17. Xu L.X., Chen B.K., Li C.Y. Dynamic modelling and contact analysis of bearing-cycloid-pinwheel transmission mechanisms used in joint rotate vector reducers. *Mechanism and Machine Theory,* 2019, vol. 137, pp. 432–458. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.035.

18. Kodnyanko V., Shatokhin S., Kurzakov A., Pikalov Y. Theoretical analysis of compliance and dynamics quality of a lightly loaded aerostatic journal bearing with elastic orifices. *Precision Engineering*, 2021, vol. 68, pp. 72–81. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.11.012.

19. Mott R.L. *Machine elements in mechanical design*. 5th ed. Pearson, 2013. 816 p. ISBN: 0135077931. ISBN: 978-0135077931.

20. Novotný P., Jonák M., Vacula J. Evolutionary optimisation of the thrust bearing considering multiple operating conditions in turbomachinery. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 195, p. 106240. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106240.

21. Kaipio T., Smelov L., Morgan C., Leighton N. A practical approach to motion control for varying inertia systems. *Progress in system and robot analysis and control design*. Ed. by S.G. Tzafestas, G. Schmidt. London, Springer, 1999, pp. 195–204. DOI: 10.1007/BFb0110545.

22. Vulfson I. *Dynamics of cyclic machines*. Cham, Springer International, 2015. 390 p. ISBN 978-3-319-12633-3. eISBN 978-3-319-12634-0. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.

23. Zawislak S., Rysinski J. *Graph-based modelling in engineering*. Switzerland, Springer International, 2017. 247 p. ISBN 978-3-319-39018-5. eISBN 978-3-319-39020-8. DOI: 10.1007/978-3-319-39020-8.

24. Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Podgornyj Yu.I., Lobanov D.V. Synthesis of irregular motion mechanisms for production machine drives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 843, p. 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/843/1/012006.

25. Podgornyi Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Kosilov A.S., Chernysheva A.A., Skeeba P.Yu. Experimental determination of useful resistance value during pasta dough kneading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, iss. 8, p. 082039. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082039.

26. Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Lobanov D.V., Zhirova A.A., Bredikhina A.N., Kosilov A.S., Pechorkina N.S. Metodika uravnoveshivaniya rotorov tekhnologicheskikh mashin [The methods of technological machines' rotors balance]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 2 (71), pp. 41–50. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50.

27. Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu., Lobanov D.V., Martyushev N.V. Algorithm for determining the unbalances of continuous mixers rotors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1061, p. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012071.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

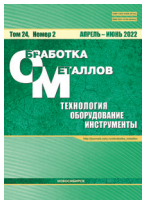
© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2022 Том 24 № 2 с. 78–90
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-78-90

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Электроискровое осаждение порошка диборида хрома на нержавеющую сталь AISI 304

Александр Бурков [1, a, *], *Мария Кулик* [1, b], *Александр Беля* [1, c], *Валерия Крутикова* [2, d]

[1] Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт материаловедения ДВО РАН, ул. Тихоокеанская, 153, 680042, г. Хабаровск, Россия
[2] Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю. Чена, 65, 680000, г. Хабаровск, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-5636-4669, burkovalex@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-4857-1887, marijka80@mail.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0001-8795-3346, whitewolf-97@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0001-9977-2809, nm32697@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.762

История статьи:
Поступила: 24 февраля 2022
Рецензирование: 15 марта 2022
Принята к печати: 23 марта 2022
Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:
Электроискровое легирование
Нержавеющая сталь AISI304
Борид хрома
Смачиваемость
Коррозия
Жаростойкость
Износ

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Аустенитная нержавеющая сталь AISI 304 является наиболее широко используемым типом нержавеющих сталей. Однако она подвержена износу вследствие недостаточно высокой твердости, а также начинает интенсивно окисляться на воздухе при температурах выше 800 °С. Применение покрытий на основе борида хрома может улучшить ее триботехнические свойства и жаростойкость. **Цель работы:** исследования влияния концентрации диборида хрома в анодной смеси на структуру, поведение при изнашивании, жаростойкость и коррозионные свойства электроискровых покрытий на стали AISI 304. **Методы исследования.** Электроискровая обработка стали AISI 304 осуществлялась в смеси железных гранул с добавкой порошка CrB_2 5, 10 и 15 об.%. Структуру покрытий изучали методами рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Износостойкость покрытий исследовалась в условиях сухого трения при нагрузке 10 Н. Испытание на жаростойкость проводилось при температуре 900 °С в течение 100 часов. **Результаты и обсуждение.** По данным рентгенофазового анализа показано, что в условиях электроискрового воздействия CrB_2 взаимодействует с расплавом железа, приводя к формированию боридов хрома и железа. Коррозионные свойства, микротвердость, коэффициент трения и износ были исследованы по сравнению со сталью AISI 304. Образцы с покрытиями показали более низкий потенциал и ток коррозии по сравнению с подложкой в 3,5 %-м растворе NaCl и от 5 до 15 раз более высокую жаростойкость. Микротвердость покрытий возрастала от 6,25 до 7,60 ГПа при увеличении добавки диборида хрома в электродной смеси. Коэффициент трения и интенсивность изнашивания всех покрытий были ниже, чем у нержавеющей стали AISI 304, при этом лучшими триботехническими характеристиками обладало покрытие, приготовленное с добавкой 5 об.% диборида хрома.

Для цитирования: Электроискровое осаждение порошка диборида хрома на нержавеющую сталь AISI 304 / А.А. Бурков, М.А. Кулик, А.В. Беля, В.О. Крутикова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 78–90. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-78-90.

Введение

Аустенитная нержавеющая сталь AISI 304 обладает отличными механическими свойствами и хорошей устойчивостью к окислению, а также высокой коррозионной стойкостью в самых разных средах. Благодаря этому сталь AISI 304 является наиболее широко используемым типом нержавеющих сталей и используется в качестве компонентов конструкций, подверженных коррозии. Так, она применяется при создании ядерных реакторов, в медицинской сфере и пищевой промышленности [1]. Однако из-за низкой твердости (~2 ГПа) сталь AISI 304 сильно подвержена износу [2]. Добавление углерода может увеличить твердость нержавеющей стали, но одновременно снизит ее пластичность. Нанесение упрочняющих покрытий может повысить твердость поверхности нержа-

***Адрес для переписки**
Бурков Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с.
Институт материаловедения ХФИЦ ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153
680042, г. Хабаровск, Россия
Тел.: +79141618954 , **e-mail:** burkovalex@mail.ru

веющей стали и улучшить ее трибологическое поведение [3, 4].

Металлокерамические (МК) материалы представляют собой композит из керамических фаз, внедренных в металлическую матрицу [5]. Благодаря керамическим включениям МК покрытия обладают высокой твердостью, а пластичная металлическая связка обеспечивает высокую прочность и адгезию с подложкой, что в совокупности приводит к высоким показателям износостойкости [6, 7]. Бориды переходных металлов обладают высокой твердостью и поэтому рассматриваются в качестве керамического компонента МК покрытий [8]. Так, в работе [9] показано, что FeCrB покрытия позволяют улучшить микротвердость и износостойкость стали ASTM 283-C. В работе [10] показано, что увеличение содержания боридной керамики в МК-покрытиях приводит к повышению их микротвердости. По данным статьи [11], микротвердость борированой стали AISI 304 может достигать 17 ГПа.

Электроискровое легирование (ЭИЛ) широко применяется для нанесения МК-покрытий на металлические подложки [12–14]. ЭИЛ основано на явлении полярного переноса металла с анода на катод в процессе воздействия множества микродуговых разрядов [15]. Благодаря высокой скорости охлаждения материала после прекращения разряда формируется покрытие с исключительно мелкозернистой структурой [16]. Кроме того, ЭИЛ характеризуется высокой адгезией формируемого слоя к основе без термического влияния на объемные характеристики материала подложки [17]. Модифицированный метод ЭИЛ нелокализованным электродом в смеси гранул с порошком керамики имеет ряд преимуществ по сравнению традиционным ЭИЛ, поскольку не требует дополнительных операций по подготовке МК электродов и позволяет наносить покрытия на детали с криволинейной поверхностью в автоматическом режиме [18]. Кроме того, метод электроискровой обработки нелокализованным электродом характеризуется низкой стоимостью оборудования по сравнению с другими методами осаждения МК-покрытий.

В настоящей работе для получения Fe-CrB МК-покрытий нержавеющая сталь AISI 304 обрабатывалась в смеси железных гранул с разной концентрацией порошка диборида хрома CrB_2 с целью установления влияния концентрации порошка CrB_2 в анодной смеси на структуру, поведение при изнашивании, жаростойкость и коррозионные свойства формируемых ЭИЛ покрытий.

Методика исследований

В качестве нелокализованного электрода использовались три анодные смеси из стальных гранул (сталь Ст3) в виде цилиндров (d = 4 ± 0,5 мм, h 4 ± 0,5 мм) и порошка CrB_2 марки ХЧ (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Содержание CrB_2 в анодной смеси, обозначение и характеристики покрытий

The content of CrB_2 in the anode mixture, designation and characteristics of coatings

Концентрация CrB_2, об.% CrB_2 concentration, vol.%	5	10	15
Наименование образцов Designation of samples	Cr5	Cr10	Cr15
Характеристики покрытий Characteristics of coatings			
Толщина, мкм Thickness, μm	35,7 ± 2,3	33,5 ± 5,7	30,7 ± 6,1
Шероховатость (Ra), мкм Roughness (Ra), μm	7,1 ± 0,88	7,4 ± 1,14	9,1 ± 0,60
Угол смачивания водой, ° Water contact angle, °	70,2±8,6	58,1 ± 5,8	57,6 ± 10,6

Диаметр частиц порошка был значительно меньше, чем диаметр области воздействия разряда ~0,8 мм, и находился в диапазоне от 25 до 134 мкм с медианой 62 мкм (рис. 1). Подложка (катод) из нержавеющей стали AISI 304 (табл. 2) была изготовлена в форме цилиндра диаметром 12 мм и высотой 10 мм. Схема установки для осаждения покрытий нелокализованным анодом с добавлением порошка подробно описана в работе [19]. Генератор разрядных импульсов IMES-40 вырабатывал импульсы тока прямоугольной формы амплитудой 110 А, длительностью 100 мкс и частотой 1000 Гц при напряжении 30 В. Для предотвращения окисления поверхности образцов в рабочий объем контейнера подавался защитный газ – аргон со скоростью 10 л/мин.

Кинетика массопереноса исследовалась поочередным взвешиванием катода через каждые 120 с, ЭИЛ – на аналитических весах Vibra HT120

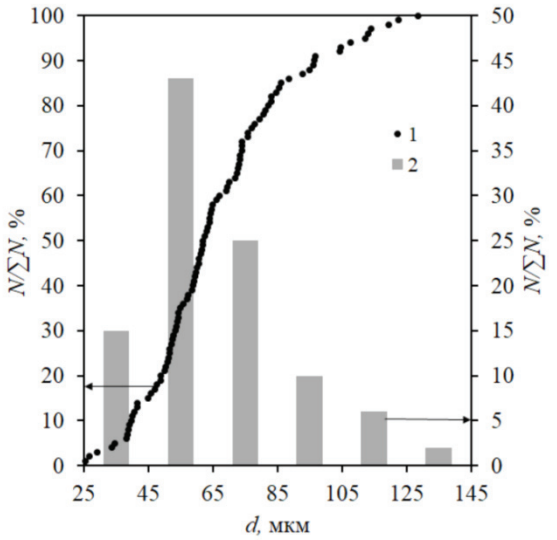


Рис. 1. Распределение частиц порошка диборида хрома по диаметру:
1 – интегральное; *2* – дифференциальное

Fig. 1. Distribution of chromium diboride powder particles by diameter:
1 – integral; *2* – differential

с точностью 0,1 мг. Общее время обработки одного образца составляло 600 с. Для обеспечения воспроизводимости результатов привес катода был исследован для трех образцов из каждой серии. Структура приготовленных покрытий исследовалась с применением растрового электронного микроскопа (СЭМ) Sigma 300 VP, оснащенного спектральным анализатором INCA Energy, и рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в Cu-Kα-излучении. Шероховатость покрытий была измерена на профилометре TR 200. Измерение краевого угла смачивания водой осуществлялось при комнатной температуре согласно методу сидящей капли [20]. Поляризационные испытания проводились в трехэлектродной ячейке в 3,5 %-м растворе NaCl с использованием гальваностата P-2X (Electro Chemical Instruments, Россия) со скоростью сканирования 10 мВ/с. Стандартный Ag/AgCl электрод выступал электродом сравнения, а в качестве контрэлектрода использовался спаренный платиновый электрод ЭТП-02. Перед съемкой образцы выдерживались 30 минут для стабилизации тока разомкнутой цепи. Плотность коррозионного тока была извлечена методом экстраполяции Тафеля. Тесты на циклическую жаростойкость проводили в муфельной печи при температуре 900 °С на воздухе. Образцы в виде куба с ребром 6 мм выдерживали при заданной температуре в течение ~6 ч, затем удаляли и охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры. Общее время тестирования составляло 100 часов. Во время испытания на жаростойкость образцы помещались в керамические тигли для учета массы отслоившихся оксидов. Изменение массы образцов измеряли с использованием лабораторных весов с чувствительностью 10^{-4} г. Прирост массы Δm для стали 45 и покрытий после испытания на жаростойкость рассчитывали по следующей формуле:

Таблица 2
Table 2

Химический состав стали AISI304
Chemical composition of AISI304 steel

Элемент Element	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	P	C	S
Концентрация, вес. % Concentration, wt. %	66,3…74	18	8	≤2	≤1	≤0,045	≤0,03	≤0,03

$$\Delta m = \frac{\Delta w}{S},$$

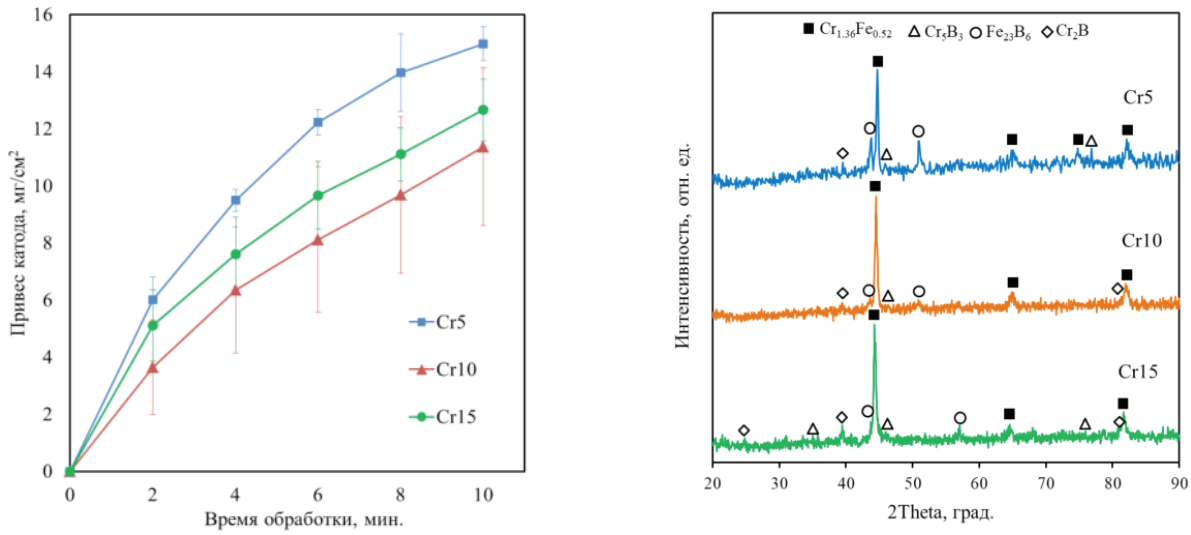
где Δw – увеличение массы (г); S – площадь образцов (м^2) соответственно.

Твердость покрытий измерялась на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н по методу Виккерса. Износостойкость и коэффициент трения образцов исследовались, следуя процедуре ASTM G99 – 17 при сухом трении скольжения на скорости 0,47 мс$^{-1}$ при нагрузке 25 Н. Время тестирования составляло 20 минут. В качестве контртела использовались диски из быстрорежущей стали М45 с твердостью 60 HRC. Износ измеряли гравиметрическим способом. Образец каждого типа испытывался трехкратно.

Результаты и их обсуждение

Изучение массопереноса при ЭИЛ имеет важное значение для установления факта положительного привеса катода, в противном случае ЭИЛ неэффективно. Кроме того, толщина покрытия является функцией от привеса катода [21]. В ходе ЭИЛ возникали электрические разряды между стальными гранулами и подложкой, в результате которых происходил жидкофазный перенос металла с поверхности гранул на поверхность подложки. Частицы порошка, оказавшиеся на поверхности электродов в момент развития разрядного канала, сплавлялись с металлом. Это сопровождалось монотонным увеличением привеса катода (рис. 2, *а*). С ростом времени обработки для всех смесей наблюдалось замедление привеса катода, что также характерно для традиционного ЭИЛ [22]. Это объясняется накоплением дефектов в легированном слое и интенсификацией его электрической эрозии с ростом удельного числа разрядов [23]. Наибольший привес катода осуществлялся за 600 с. ЭИЛ наблюдался для анодной смеси Cr5, а в случае смесей Cr10 и Cr15, с учетом планок погрешностей, привес можно считать близким. Такое поведение массопереноса можно объяснить ухудшением электрического контакта и снижением частоты возникновения разрядов с ростом концентрации порошка в смеси гранул, что наблюдалось ранее для порошка кремния [24]. Поэтому с позиции достижения максимальной толщины покрытия оптимальная концентрация порошка CrB_2 в смеси с железными гранулами находится около 5 об.%.

На рис. 2, *б* показаны результаты рентгенофазового анализа (РФА) приготовленных покрытий. Из него следует, что в составе покрытий преобладал твердый раствор хрома в железе, образующий металлическую связку покрытия,



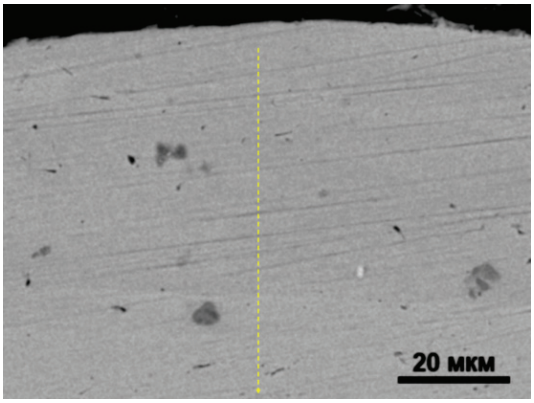
а *б*

Рис. 2. Привес катода из нержавеющей стали AISI304 в процессе ЭИЛ (*а*) и рентгеновские дифрактограммы осажденных покрытий (*б*)

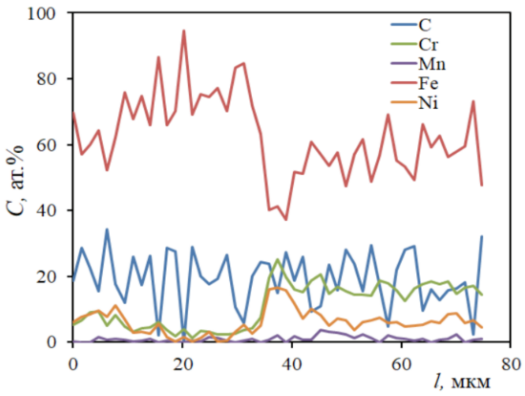
Fig. 2. AISI 304 stainless steel cathode weight gain during ESD (*a*) and X-ray diffraction patterns of deposited coatings (*б*)

а также присутствуют керамические фазы боридов хрома (Cr_5B_3, Cr_2B) и железа ($Fe_{23}B_6$). Это указывает на то, что исходная фаза CrB_2 не сохранилась в покрытии по причине высокой реакционной способности с расплавами железа и хрома в условиях электрического разряда. Таким образом, в данном случае реализуется механизм кристаллизации керамических фаз из расплава после прекращения разряда.

На рис. 3, *а* показано изображение поперечного сечения покрытия Cr5 и данные профиля распределения элементов согласно ЭДС анализу. Покрытие имеет немного более темный оттенок по сравнению с подложкой из-за обогащения бором, который не фиксировал ЭДС анализ. Рис. 3, *б* показывает резкий переход между осажденным слоем и подложкой, а также указывает на уменьшение концентрации элементов подложки



а



б

Рис. 3. СЭМ-изображение элементов в поперечном сечении покрытия Cr5 в режиме обратно-отраженных электронов (*а*) и ЭДС-распределение элементов по глубине (*б*)

Fig. 3. SEM image of the elements of the cross-section of the Cr5 coating in the back scattered electrons mode (*a*) and *EDS* distribution of elements in depth (*б*)

в структуре покрытия, что объясняется переносом железа из гранул. Покрытие имело плотную однородную структуру с небольшим количеством мелких пор. С ростом концентрации порошка в анодной смеси монотонно снижалась средняя толщина покрытий с 35,7 до 30,7 мкм, а шероховатость (Ra) возрастала от 7,1 до 9,1 мкм (см. табл. 1). Для исследования гидрофобных свойств поверхности покрытий был измерен краевой угол смачивания водой (УСВ), который обратно пропорционален поверхностной энергии. Как показано в табл. 1, УСВ уменьшался с 70,2 до 57,6° с ростом концентрации CrB_2 в анодной смеси, что означает снижение гидрофобности их поверхности. Однако в целом электроискровые Fe-Cr-B покрытия обладали меньшей поверхностной энергией и большей гидрофобностью по сравнению с нержавеющей сталью AISI 304 (УСВ 48,9°).

На рис. 4 показаны результаты поляризационных испытаний образцов в 3,5 %-м растворе

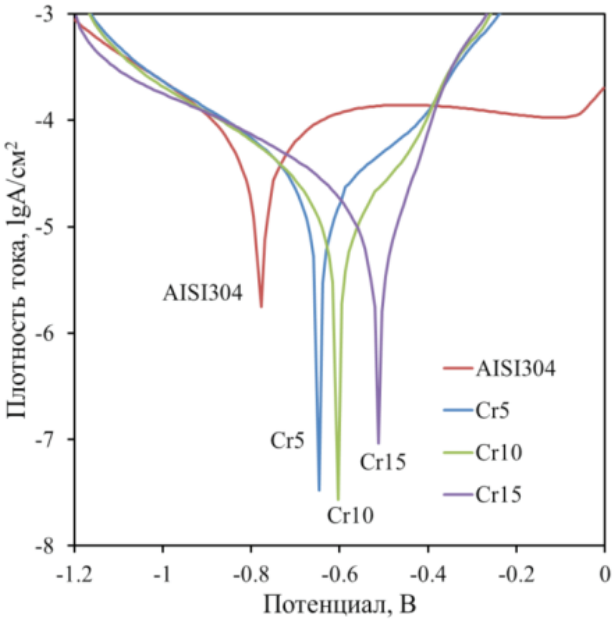


Рис. 4. Тафелевские поляризационные кривые покрытий и подложки

Fig. 4. Tafel polarization curves of coatings and substrate

NaCl при комнатной температуре. На нем видно, что потенциодинамические кривые всех покрытий демонстрируют значительно больший потенциал коррозии E_{corr} по сравнению со сталью AISI 304. Для детального описания коррозионного поведения образцов по наклонам тафелевских участков потенциодинамических кривых был рассчитан ток коррозии I_{corr} (табл. 3). Из табл. 3 следует, что с ростом количества порошка CrB_2 в смеси гранул ток коррозии покрытий монотонно снижался, что указывает на улучшение антикоррозионного поведения. Таким образом, насыщение поверхности стали AISI 304 боридом хрома позволяет улучшить ее антикоррозионное поведение. Это объясняется барьерным действием тонкой пленки Cr_2O_3, неизбежно формирующейся на поверхности металлического хрома [25]. Кроме того, керамические фазы ограничивают площадь контакта металла с электролитом [6].

На рис. 5, *а* показаны результаты циклических испытаний Fe-Cr-B покрытий на жаростойкость при температуре 900 °C. Привес образцов с покрытиями по результатам 100 часов испытаний составил от 17 до 51 г/м^2. Наименьший привес наблюдался у образца Cr15, а наибольший – у Cr10, однако в данном случае величина привеса не является однозначным критерием интенсивности окисления. Так, на вставке к рис. 5, *а* видно,

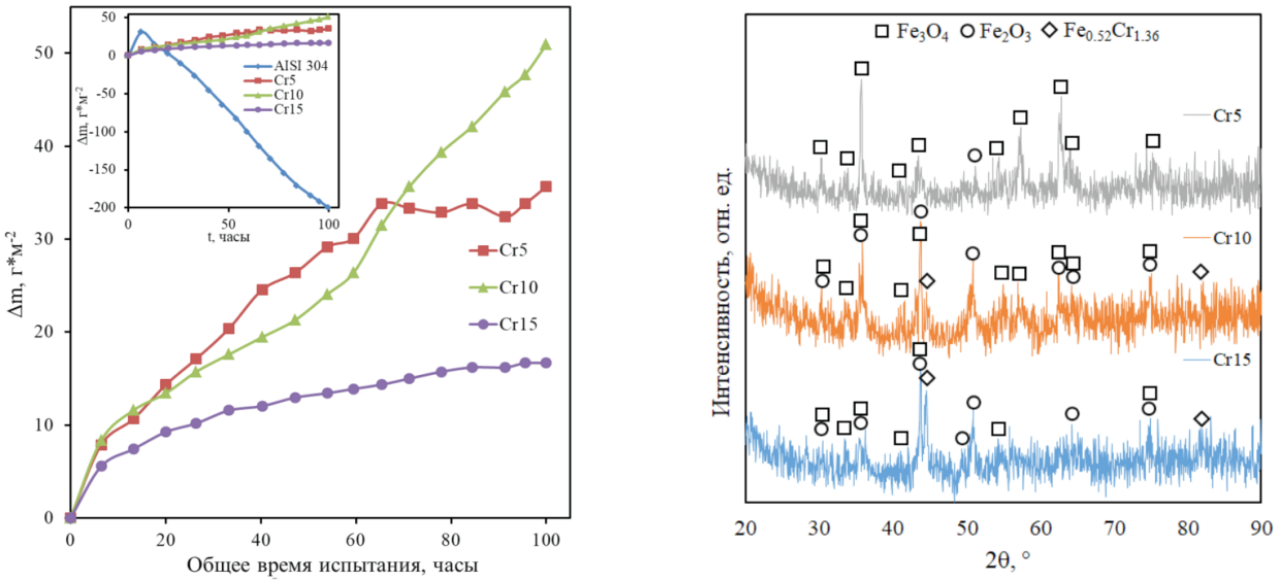
Таблица 3

Table 3

Коррозионные параметры покрытий

Corrosion parameters of coatings

Параметры Parameters	Образцы Samples			
	AISI304	Cr5	Cr10	Cr15
E_{corr}, *V*	–0,777	–0,646	–0,603	–0,489
I_{corr}, μA/cm^2	42,24	20,66	14,80	11.47



а *б*

Рис. 5. Жаростойкость покрытий при температуре 900 °C на воздухе (*а*) и рентгеновские дифрактограммы поверхности образцов после испытания на жаростойкость (*б*)

Fig. 5. Oxidation resistance of coatings at a temperature of 900 °C in air (*a*) and X-ray patterns of the surface of samples after the oxidation resistance test (*б*)

что сталь AISI 304 без покрытия в первом цикле испытания прибавила в весе, а в последующих монотонно теряла вещество. Это нельзя объяснить отслоением оксидных слоев, как было сказано в работе [26], по причине нахождения образцов в керамических тиглях в процессе испытания на жаростойкость. Поэтому единственным объяснением наблюдаемой потери массы стали AISI 304 может быть выгорание углерода, фосфора и серы, входящих в ее состав (см. табл. 2). Примечательно, что в вышеуказанной работе за 100 часов испытаний при 900 °С привес стали AISI 304 составил всего 6,5 г/м^2, а в работе [27] – 22,2 г/м^2 за 90 часов. Скорость окисления образца Cr5 была наибольшей среди покрытий до 65 часов, а затем привес прекратился, что можно объяснить действием двух разнонаправленных процессов: потерей массы подложкой и привесом покрытия. Таким образом, жаростойкость покрытия Cr5 можно квалифицировать как наихудшую. Лучшей жаростойкостью обладало покрытие Cr15. Привес в процессе высокотемпературного окисления обусловлен фиксацией кислорода на поверхности образцов с образованием магнетита Fe_2O_3 и гематита Fe_2O_3 (рис. 5, *б*). По данным РФА на поверхности образцов после испытания на жаростойкость также наблюдался феррохром $Fe_{0.52}Cr_{1.36}$, интенсивность рефлексов которого монотонно возрастала от образца Cr5 к Cr15. Это объясняется снижением толщины оксидного слоя и подтверждает улучшение жаростойкости покрытий с ростом CrB_2 в анодной смеси. В целом применение электроискровых Fe-Cr-B покрытий позволяет повысить жаростойкость нержавеющей стали AISI304 от 5 до 15 раз.

На рис. 6 показано, что осаждение Fe-Cr-B покрытий позволяет повысить твердость поверхности стали AISI 304 в 2,2 – 2,7 раз. С увеличением концентрации порошка CrB_2 в анодной смеси средняя микротвердость поверхности покрытий возрастала от 6,25 до 7,6 ГПа. Это может объясняться увеличением содержания хрома и боридных фаз в покрытии. Тем не менее умеренные значения твердости по сравнению с высокой твердостью боридов свидетельствуют о невысокой объемной доле керамических фаз в покрытиях, что согласуется с данными фазового анализа. В основном эти результаты согласуются с данными, полученными

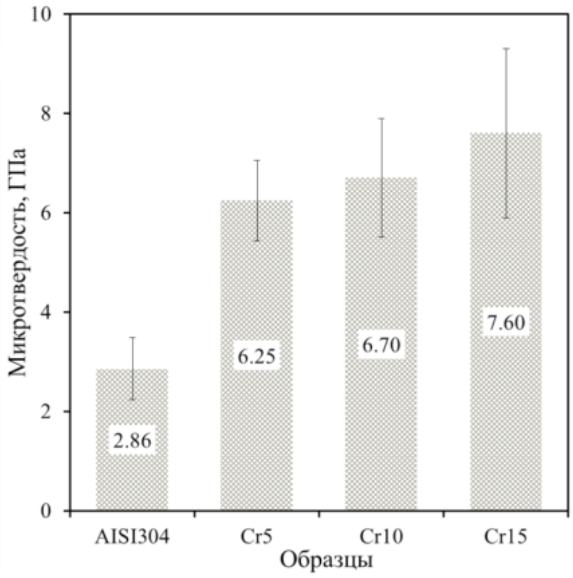


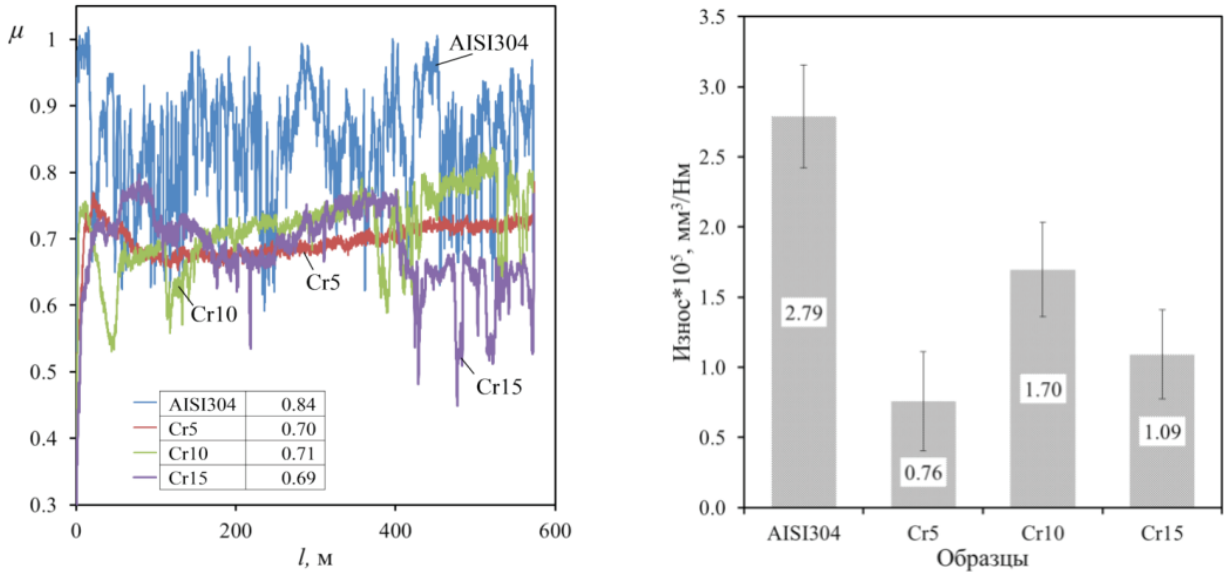
Рис. 6. Микротвердость покрытий по сравнению со сталью AISI 304

Fig. 6. Microhardness of coatings compared to AISI 304 steel

в работе [9], где микротвердость газопламенных $Fe_{87-x}Cr_{13}B_x$ покрытий повышалась от 7,9 до 9 ГПа с ростом содержания бора от 1 до 4 масс.%.

Кинетика изменения коэффициента трения образцов при испытании на износ в режиме сухого скольжения показана на рис. 7, *а*. Средние значения коэффициента трения покрытий были ниже, чем у нержавеющей стали, и находились в узком диапазоне от 0,69 до 0,71. Однако для образцов Cr10 и Cr15, осажденных с высоким содержанием порошка в анодной смеси, наблюдались узкие провалы на кривых коэффициента трения, тогда как у покрытия Cr5 кривая была гладкой. В отношении стали наблюдался высокий уровень шума на графике коэффициента трения, что связано с ее высокой пластичностью и с периодическим отложением и отслоением переносимого между трущимися поверхностями материала [28]. Так, в частности, у образцов Cr10 и Cr15 шум может быть вызван отслоением микроучастков покрытия из-за дефицита пластичной металлической связки.

Результаты испытания покрытий на износ показали, что интенсивность изнашивания находилась в диапазоне 0,76…1,7 · 10^{-5} мм^3/Нм (рис. 7, *б*). Она была ниже, чем у стали AISI 304, от 1,6 до 3,7 раз. Наиболее низкие значения износа продемонстрировало покрытие Cr5, что согласуется с данными по коэффициенту трения.



а *б*

Рис. 7. Динамика коэффициента трения от пути скольжения (*а*) и приведенный износ (*б*) покрытий по сравнению с нержавеющей сталью AISI 304

Fig. 7. Dynamics of the coefficient of friction from the sliding path (*a*) and the wear rate (*б*) of coatings compared to AISI304 stainless steel

При более высокой концентрации CrB_2 в смеси гранул износ образцов возрастал, что вызвано снижением объема пластичной металлической связки у данных покрытий и нарастающей хрупкостью в условиях трения. Кроме того, при анализе износостойкости образца Cr5 стоит учитывать большую толщину данного покрытия по сравнению с другими образцами, на что указывают данные по привесу катода (рис. 2. *а*).

Заключение

Были приготовлены металлокерамические Fe-Cr-B покрытия на нержавеющей стали AISI 304 путем ее электроискровой обработки в смеси железных гранул и 5…15 об.% порошка CrB_2. Наибольший привес катода, а следовательно, и толщина покрытия были зафиксированы при использовании анодной смеси с 5 об.% CrB_2. Данные рентгенофазового анализа указывают на металлокерамическую структуру покрытий, где роль связки выполняет феррохром, а функцию керамики – фазы Cr_5B_3, Cr_2B и $Fe_{23}B_6$. Бориды образовались в результате полной деструкции CrB_2 при взаимодействии с расплавом железа в условиях электрического разряда. С ростом концентрации CrB_2 в анодной смеси наблюдалось улучшение антикоррозионных свойств Fe-Cr-B покрытий в 3,5 %-м растворе NaCl и повышение жаростойкости по сравнению со сталью AISI 304 от 5 до 15 раз. Применение электроискровых Fe-Cr-B покрытий на нержавеющей стали AISI 304 позволяет повысить твердость ее поверхности, снизить и стабилизировать коэффициент трения, а также улучшить износостойкость в 3,7 раза.

Список литературы

1. Corrosion resistance of boronized, aluminized, and chromized thermal diffusion-coated steels in simulated high-temperature recovery boiler conditions / A. Mahdavi, E. Medvedovski, G.L. Mendoza, A. McDonald // Coatings. – 2018. – Vol. 8, iss. 8. – P. 257. – DOI: 10.3390/coatings8080257.

2. Tribocorrosion behaviour of duplex surface treated AISI 304 stainless steel / A. de Frutos, M.A. Arenas, G.G. Fuentes, R.J. Rodríguez, R. Martínez, J.C. Avelar-Batista, J.J. de Damborenea // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204, iss. 9–10. – P. 1623–1630. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.10.039.

3. *Ushashri K., Masanta M.* Hard TiC coating on AISI304 steel by laser surface engineering using pulsed Nd: YAG laser // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 6. – P. 730–735. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973593.

4. *Sahoo C.K., Masanta M.* Microstructure and mechanical properties of TiC-Ni coating on AISI304 steel produced by TIG cladding process // Journal of

Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 240. – P. 126–137. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.018.

5. *Голышев А.А., Оришич А.М.* Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 82–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92.

6. The corrosion behaviour of a plasma spraying Al_2O_3 ceramic coating in dilute HCl solution / D. Yan, J. He, J. Wu, W. Qiu, J. Ma // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol. 89, iss. 1–2. – P. 191–195. – DOI: 10.1016/S0257-8972(96)02862-9.

7. *Berger L.-M.* Application of hardmetals as thermal spray coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.

8. *Мишигдоржийн У.Л., Сизов И.Г., Полянский И.П.* Формирование покрытий на основе бора и алюминия на поверхности углеродистых сталей электронно-лучевым легированием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20., № 2. – С. 87–99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99.

9. Microstructure and properties of FeCrB alloy coatings prepared by wire-arc spraying / H.H. Yao, Z. Zhou, Y.M. Wang, D.Y. He, K. Bobzin,·L. Zhao, M. Öte, T. Königstein // Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26, iss. 3. – P. 483–491. – DOI: 10.1007/s11666-016-0510-9.

10. *Kılıç M.* Microstructural characterization of Ni-based B_4C reinforced composite coating produced by tungsten inert gas method // Archives of Metallurgy and Materials. – 2021. – Vol. 66 (3). – P. 917–924. – DOI: 10.24425/amm.2021.136398.

11. *Turkoglu T., Ay I.* Investigation of mechanical, kinetic and corrosion properties of borided AISI 304, AISI 420 and AISI 430 // Surface Engineering. – 2021. – Vol. 37, iss. 8. – P. 1020–1031. – DOI: 10.1080/02670844.2021.1884332.

12. *Nikolenko S.V., Konevtsov L.A., Chigrin P.G.* Additive influence of carbon and carbides of vanadium and chrome in anodic tungsten-cobalt materials on their erosive fragility and formation of the alloyed layer at ESA of steels 35 // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2020. – Vol. 992. – P. 683–688. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.683.

13. Application of Zr-Si-B electrodes for electrospark alloying of Inconel 718 in vacuum, argon and air environment / A.E. Kudryashov, Ph.V. Kiryukhantsev-Korneev, M.I. Petrzhik, E.A. Levashov // CIS Iron and Steel Review. – 2019. – Vol. 18. – P. 46–51. – DOI: 10.17580/cisisr.2019.02.10.

14. A novel method to fabricate composite coatings via ultrasonic-assisted electro-spark powder deposition / H. Zhao, Ch. Gao, X. Wu, B. Xu, Y. Lu, L. Zhu // Ceramics International. – 2019. – Vol. 45, iss. 17. – P. 22528–22537. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.07.279.

15. *Chandrakant, Reddy N.S., Panigrahi B.B.* Electro spark coating of AlCoCrFeNi high entropy alloy on AISI410 stainless steel // Materials Letters. – 2021. – Vol. 304. – P. 130580. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130580.

16. *Shafyei H., Salehi M., Bahrami A.* Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB2 composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, iss. 10. – P. 15276–15284. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.03.068.

17. *Li C., Ge P., Bi W.* Thermal simulation of the single discharge for electro-spark deposition diamond wire saw // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 114, iss. 11. – P. 3597–3604. – DOI: 10.1007/s00170-021-07132-0.

18. *Бурков А.А.* Получение аморфных покрытий электроискровой обработкой стали 35 в смеси железных гранул с CrMoWCBSi порошком // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21., № 4. – С. 19–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-19-30.

19. *Burkov A.A., Kulik M.A.* Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr_7C_3 obtained by electric spark deposition // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2020. – Vol. 56, iss. 6. – P. 1217–1221. – DOI: 10.1134/S2070205120060064.

20. *Kwok D.Y., Neumann A.W.* Contact angle measurement and contact angle interpretation // Advances in Colloid and Interface Science. – 1999. – Vol. 81, iss. 3. – P. 167–249. – DOI: 10.1016/S0001-8686(98)00087-6.

21. Comparative analysis of insulating properties of plasma and thermally grown alumina films on electrospark aluminide coated 9Cr steels / N.I. Jamnaparaa, S. Frangini, J. Alphonsa, N.L. Chauhan, S. Mukherjee // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 266. – P. 146–150. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.02.028.

22. *Khimukhin S.N., Eremina K.P., Nikolenko S.V.* Obtaining of coatings from Ni-Al by electro spark deposition and surface smoothing by ultrasonic plastic deformation // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2021. – Vol. 1037. – P. 473–478. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.473.

23. *Nikolenko S.V., Syui N.A.* Investigation of coatings produced by the electro spark machining method of steel 45 with electrodes based on carbides of tungsten and titanium // Protection of Metals and Physical Chemistry

of Surfaces. – 2017. – Vol. 53, iss. 5. – P. 889–894. – DOI: 10.1134/S207020511705015X.

24. *Бурков А.А., Кулик М.А., Крутикова В.О.* Характеристика Ti–Si-покрытий на сплаве Ti6Al4V, осажденных электроискровой обработкой в среде гранул // Цветные металлы. – 2019. – № 4. – С. 54–59. – DOI: 10.17580/TSM.2019.04.07.

25. Evaluation of three kinds of MCrAlY coatings produced by electrospark deposition / Y.-j. Xie, D. Wang, M.-s. Wang, W. Ye // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26, iss. 6. – P. 1647–1654. – DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64274-7.

26. Effect of mullite film layers on the high-temperature oxidation resistance of AISI 304 stainless steel / J. Ma, N. Wen, R. Wang, J. Wang, X. Zhang, J. Li, Y. Chen // Coatings. – 2021. – Vol. 11, iss. 8. – P. 880. – DOI: 10.3390/coatings11080880.

27. Beneficial effect of a pre-ceramic polymer coating on the protection at 900 °C of a commercial AISI 304 stainless steel / F. Riffard, E. Joannet, H. Buscail, R. Rolland, S. Perrier // Oxidation of Metals. – 2017. – Vol. 88, iss. 1. – P. 211–220. – DOI: 10.1007/s11085-016-9705-1.

28. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding / C. Guangxiong, Z. Zhongrong, P. Kapsa, L. Vincent // Wear. – 2002. – Vol. 253, iss. 3–4. – P. 411–423. – DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00161-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 78–90
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-78-90

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Electrospark deposition of chromium diboride powder on stainless steel AISI 304

Alexander Burkov [1, a, *], *Maria Kulik* [1, b], *Alexander Belya* [1, c], *Valeria Krutikova* [2, d]

[1] Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 153 Tikhookeanskaya, Khabarovsk, 680042, Russian Federation

[2] Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim Yu Chen street, Khabarovsk, 680000, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-5636-4669, burkovalex@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-4857-1887, marijka80@mail.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0001-8795-3346, whitewolf-97@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0001-9977-2809, nm32697@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 24 February 2022
Revised: 15 March 2022
Accepted: 23 March 2022
Available online: 15 June 2022

Keywords:
Electrospark deposition
Stainless steel AISI 304
Chromium boride
Wettability
Corrosion
Oxidation resistance
Wear

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

ABSTRACT

Introduction. Austenitic stainless steel *AISI 304* is the most widely used type of stainless steel. However, it is subject to wear due to relatively low hardness, and also begins to oxidize intensively in air at a temperature above 800 °C. The use of coatings based on chromium boride can improve its tribotechnical properties and oxidation resistance. **The purpose of the work**: to study the effect of chromium diboride concentration in the anode mixture on the structure, wear behavior, oxidation resistance and corrosion properties of electric spark coatings on *AISI 304* steel. **The research methods**. Electric spark treatment of *AISI 304* steel was carried out in a mixture of iron granules with the addition of CrB_2 powder in amount of 5, 10 and 15 vol.%. The structure of the coatings was studied by X-ray analysis, scanning electron microscopy, and electron dispersion spectroscopy analysis. The wear resistance of the coatings was studied under dry friction condition at a load of 10 N. The oxidation resistance test was carried out at a temperature of 900 °C for 100 hours. **Results and Discussion**. According to X-ray analysis, it is shown that under the conditions of electric spark exposure, CrB_2 interacts with iron melt; this has resulted in the formation of chromium and iron borides. Corrosion properties, microhardness, coefficient of friction and wear are investigated in comparison with *AISI 304* steel. Samples with coatings showed a lower corrosion potential and corrosion current density compared to the substrate in 3.5% *NaCl* solution and from 5 to 15 times higher oxidation resistance. The microhardness of the coatings increased from 6.25 to 7.60 GPa with an increase in the addition of chromium diboride in the electrode mixture. The coefficient of friction and the wear rate of all coatings were lower than that of *AISI 304* stainless steel, while the coating prepared with the addition of 5 vol.% chromium diboride had the best tribotechnical characteristics.

For citation: Burkov A.A., Kulik M.A., Belya A.V., Krutikova V.O. Electrospark deposition of chromium diboride powder on stainless steel AISI 304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 78–90. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-78-90. (In Russian).

References

1. Mahdavi A., Medvedovski E., Mendoza G.L., McDonald A. Corrosion resistance of boronized, aluminized, and chromized thermal diffusion-coated steels in simulated high-temperature recovery boiler conditions. *Coatings*, 2018, vol. 8, iss. 8, p. 257. DOI: 10.3390/coatings8080257.

2. Frutos A. de, Arenas M.A., Fuentes G.G., Rodríguez R.J., Martínez R., Avelar-Batista J.C., Damborenea J.J. de. Tribocorrosion behaviour of duplex surface treated AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 204, iss. 9–10, pp. 1623–1630. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.10.039.

*** Corresponding author**
Burkov Alexander A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior researcher
Institute of Materials Science of the Khabarovsk Scientific Center
of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
153 Tikhookeanskaya,
680042, Khabarovsk, Russian Federation
Tel.: 8 (914) 1618954, **e-mail:** burkovalex@mail.ru

3. Ushashri K., Masanta M. Hard TiC coating on AISI304 steel by laser surface engineering using pulsed Nd: YAG laser. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 6, pp. 730–735. DOI: 10.1080/10426914.2014.973593.

4. Sahoo C.K., Masanta M. Microstructure and mechanical properties of TiC-Ni coating on AISI304 steel produced by TIG cladding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 240, pp. 126–137. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.018.

5. Golyshev A.A., Orishich A.M. Issledovanie vliyaniya rezhimov fokusirovki lazernogo izlucheniya na geometricheskie i mekhanicheskie svoistva metallokeramicheskikh trekov [Study of the laser radiation focusing modes effect on geometrical and mechanical properties of metal-ceramic tracks]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Materials Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 82–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92.

6. Yan D., He J., Wu J., Qiu W., Ma J. The corrosion behaviour of a plasma spraying Al_2O_3 ceramic coating in dilute HC1 solution. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 89, iss. 1–2, pp. 191–195. DOI: 10.1016/S0257-8972(96)02862-9.

7. Berger L.-M. Application of hardmetals as thermal spray coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, vol. 49, pp. 350–364. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.

8. Mishigdorzhiyn U.L., Sizov I.G., Polaynsky I.P. Formirovanie pokrytii na osnove bora i alyuminiya na poverkhnosti uglerodistykh stalei elektronno-luchevym legirovaniem [Formation of coatings based on boron and aluminum on the surface of carbon steels by electron beam alloying]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Materials Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 87–99. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99.

9. Yao H.H., Zhou Z., Wang Y.M., He D.Y., Bobzin K.,· Zhao L., Öte M., Königstein T. Microstructure and properties of FeCrB alloy coatings prepared by wire-arc spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, iss. 3, pp. 483–491. DOI: 10.1007/s11666-016-0510-9.

10. Kılıç M. Microstructural characterization of Ni-based B_4C reinforced composite coating produced by tungsten inert gas method. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2021, vol. 66 (3), pp. 917–924. DOI: 10.24425/amm.2021.136398.

11. Turkoglu T., Ay I. Investigation of mechanical, kinetic and corrosion properties of borided AISI 304, AISI 420 and AISI 430. *Surface Engineering*, 2021, vol. 37, iss. 8, pp. 1020–1031. DOI: 10.1080/02670844.2021.1884332.

12. Nikolenko S.V., Konevtsov L.A., Chigrin P.G. Additive influence of carbon and carbides of vanadium and chrome in anodic tungsten-cobalt materials on their erosive fragility and formation of the alloyed layer at ESA of steels 35. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2020, vol. 992, pp. 683–688. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.683.

13. Kudryashov A.E., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Petrzhik M.I., Levashov E.A. Application of Zr-Si-B electrodes for electrospark alloying of Inconel 718 in vacuum, argon and air environment. *CIS Iron and Steel Review*, 2019, vol. 18, pp. 46–51. DOI: 10.17580/cisisr.2019.02.10.

14. Zhao H., Gao Ch., Wu X., Xu B., Lu Y., Zhu L. A novel method to fabricate composite coatings via ultrasonic-assisted electro-spark powder deposition. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, iss. 17, pp. 22528–22537. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.07.279.

15. Chandrakant, Reddy N.S., Panigrahi B.B. Electro spark coating of AlCoCrFeNi high entropy alloy on AISI410 stainless steel. *Materials Letters*, 2021, vol. 304, p. 130580. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130580.

16. Shafyei H., Salehi M., Bahrami A. Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB2 composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 10, pp. 15276–15284. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.03.068.

17. Li C., Ge P., Bi W. Thermal simulation of the single discharge for electro-spark deposition diamond wire saw. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 114, iss. 11, pp. 3597–3604. DOI: 10.1007/s00170-021-07132-0.

18. Burkov A.A. Poluchenie amorfnykh pokrytii elektroiskrovoi obrabotkoi stali 35 v smesi zheleznykh granul s CrMoWCBSi poroshkom [Production amorphous coatings by electrospark treatment of steel 1035 in a mixture of iron granules with CrMoWCBSi powder]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Materials Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 19–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-19-30.

19. Burkov A.A., Kulik M.A. Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr_7C_3 obtained by electric spark deposition. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2020, vol. 56, iss. 6, pp. 1217–1221. DOI: 10.1134/S2070205120060064.

20. Kwok D.Y., Neumann A.W. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1999, vol. 81, iss. 3, pp. 167–249. DOI: 10.1016/S0001-8686(98)00087-6.

21. Jamnaparaa N.I., Frangini S., Alphonsa J., Chauhan N.L., Mukherjee S. Comparative analysis of insulating properties of plasma and thermally grown alumina films on electrospark aluminide coated 9Cr steels. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 266, pp. 146–150. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.02.028.

22. Khimukhin S.N., Eremina K.P., Nikolenko S.V. Obtaining of coatings from Ni-Al by electro spark deposition and surface smoothing by ultrasonic plastic deformation. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2021, vol. 1037, pp. 473–478. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.473.

23. Nikolenko S.V., Syui N.A. Investigation of coatings produced by the electrospark machining method of steel 45 with electrodes based on carbides of tungsten and titanium. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2017, vol. 53, iss. 5, pp. 889–894. DOI: 10.1134/S207020511705015X.

24. Burkov A.A., Kulik M.A., Krutikova V.O. Characteristics of Ti–Si coatings on Ti6Al4V alloy subjected to electrospark granules deposition. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 4, pp. 54–59. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.07. (In Russian).

25. Xie Y.-j., Wang D., Wang M.-s., Ye W. Evaluation of three kinds of MCrAlY coatings produced by electrospark deposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, vol. 26, iss. 6, pp. 1647–1654. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64274-7.

26. Ma J., Wen N., Wang R., Wang J., Zhang X. Li J., Chen Y. Effect of mullite film layers on the high-temperature oxidation resistance of AISI 304 stainless steel. *Coatings*, 2021, vol. 11, iss. 8, p. 880. DOI: 10.3390/coatings11080880.

27. Riffard F., Joannet E., Buscail H., Rolland R., Perrier S. Beneficial effect of a pre-ceramic polymer coating on the protection at 900 °C of a commercial AISI 304 stainless steel. *Oxidation of Metals*, 2017, vol. 88, iss. 1, pp. 211–220. DOI: 10.1007/s11085-016-9705-1.

28. Guangxiong C., Zhongrong Z., Kapsa P., Vincent L. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding. *Wear*, 2002, vol. 253, iss. 3–4, pp. 411–423. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00161-8.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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). 2022 Том 24 № 2 с. 91–101
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние борирования и алитирования на структуру и микротвердость низкоуглеродистых сталей

Павел Гуляшинов [1, a, *], *Ундрах Мишигдоржийн* [2, b], *Николай Улаханов* [3, 2, c]

[1] Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия
[2] Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия
[3] Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40В, г. Улан-Удэ, 670013, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-6776-9314, gulpasha@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-7863-9045, undrakh@ipms.bscnet.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-0635-4577, nulahanov@mail.ru.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669 - 15:621.793.6

История статьи:
Поступила: 15 марта 2021
Рецензирование: 06 апреля 2021
Принята к печати: 27 апреля 2021
Доступно онлайн: 15 июня 2021

Ключевые слова:
Химико-термическая обработка (ХТО)
Борирование
Алитирование
Карбид бора
Алюминий
Углеродистая сталь
Легированная сталь

Финансирование:
Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского Научного Фонда (проект 19-79-10163).

Благодарности:
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Борирование и алитирование являются одними из наиболее эффективных методов повышения эксплуатационных свойств (коррозионная стойкость, жаро- и износостойкость) деталей машин и инструментов. Твердофазные способы проведения данных методов химико-термической обработки (ХТО) требуют длительной выдержки при высокой температуре, что отрицательно влияет на структуру и свойства материала основы. В связи с этим подбор обоснованных температурно-временных параметров процессов твердофазного борирования и алитирования является актуальной задачей. **Цель настоящей работы** заключается в оценке влияния процессов низкотемпературного борирования и алитирования на структуру и микротвердость диффузионных слоев на поверхности низкоуглеродистых сталей. **В работе рассмотрены** две марки сталей с содержанием углерода до 0,4 %: низкоуглеродистая сталь Ст3 и легированная сталь 3Х2В8Ф. Использование второй стали вызвано необходимостью выявить влияние легирующих элементов в стали на толщину диффузионных слоев и их состав. В качестве источников бора и алюминия выбраны порошковые смеси на основе карбида бора и алюминия. **Результаты и обсуждения.** Установлено, что при температуре процесса 900 °С и выдержке 2 часа после борирования на поверхности обеих сталей образуются бориды железа. При этом на стали Ст3 рентгенофазовым анализом (РФА) обнаружено два борида: FeB и Fe_2B, а на стали 3Х2В8Ф – только фаза Fe_2B. После алитирования обеих сталей образуется алюминий, содержащий фазы, такие как Al_5Fe_2, Na_3AlF_6 и Al_2O_3. Толщина полученного диффузионного слоя на Ст3 после борировании составляет 35 мкм, при алитировании – 65 мкм. Толщина диффузионного слоя на стали 3Х2В8Ф равна 15 мкм после борирования и 50 мкм после алитирования, что значительно меньше, чем на углеродистой стали, и, очевидно, связано с влиянием легирующих элементов. ХТО привела к значительному повышению микротвердости поверхности образцов. Так, максимальная микротвердость стали Ст3 возросла до 1920 HV, а стали 3Х2В8Ф до 1685 HV после борирования. Микротвердость после алитирования сопоставима для обеих сталей и равна 1000…1100 HV. Элементный анализ верхних участков диффузионных слоев показал соответствие содержания бора (7…9 %) и алюминия (50…53 %) обнаруженным РФА боридам и алюминидам железа. Во всех случаях наблюдается плавное снижение диффундирующих элементов по направлению от поверхности к основе.

Для цитирования: *Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С.* Влияние борирования и алитирования на структуру и микротвердость низкоуглеродистых сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 91–101. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101.

Введение

Важной проблемой современного материаловедения является повышение прочности и износостойкости инструментов и различных деталей машин за счет применения диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов раз-

***Адрес для переписки**
Гуляшинов Павел Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник
Байкальский институт природопользования
Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Сахьяновой, 6,
670047, г. Улан-Удэ, Россия
Тел.: 8 (3012) 43-36-76, **e-mail:** gulpasha@mail.ru.

личными химическими элементами. При применении термической обработки (закалка, отпуск) невозможно достичь заданных механических и эксплуатационных свойств. Альтернативой является химико-термическая обработка (ХТО), заключающаяся в диффузионном насыщении поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами. Детали, подвергнутые ХТО, могут заменить собой изделия из дорогих специальных сталей и сплавов [1, 2].

В настоящее время известно несколько методов ХТО. В зависимости от насыщающей среды различают: газовые, жидкостные и твердофазные (в порошковых средах и пастах) [3, 4].

Как известно, борированные слои имеют высокую твердость, коррозионную стойкость и износостойкость. В случае с борированием в порошковых смесях и пастах наибольшее распространение получили насыщающие смеси на основе карбида бора [5]. Алитирование представляет собой насыщение поверхности алюминием для придания окалиностойкости при высоких температурах и для повышения сопротивлению атмосферной коррозии. Для алитирования используются разнообразные смеси, состоящие из порошков алюминия или ферроалюминия, оксида алюминия и др. [6, 7].

Необходимо отметить, что твердофазные способы проведения данных методов ХТО требуют длительной выдержки при высокой температуре, что отрицательно влияет на структуру и свойства материала основы.

Известны другие методы повышения поверхностных свойств деталей машин, не требующие длительного температурного воздействия на материал основы. В первую очередь это методы обработки концентрированными потоками энергии (КПЭ), такие как лазерная и электронно-лучевая обработка (ЭЛО), способные за короткий промежуток времени нагреть участок поверхности материала [8–10]. Известны способы комбинированной обработки, сочетающие последовательные процессы ХТО с последующей лазерной и электронно-лучевой обработкой [11–13]. Последний способ позволяет модифицировать предварительно полученный диффузионный слой и устранить его дефекты (слоистость и фазовую неоднородность по глубине слоя, хрупкость, высокую поверхностную шероховатость).

Необходимо отметить, что способы упрочнения КПЭ требуют специального дорогостоящего оборудования. Их применение оправдано в случае получения свойств, недостижимых традиционной обработкой. Таким образом, можно предложить комбинированный способ обработки изделий, где на первом этапе проводится ХТО с целью получения сплошного покрытия по всей площади поверхности. Далее наиболее ответственные участки будут дополнительно подвержены ЭЛО с целью модификации диффузионных слоев. Возможно также проведение электронно-лучевого легирования (ЭЛЛ). Например, сначала проводят порошковое алитирование с печным нагревом, затем ЭЛЛ карбидом бора или, наоборот, традиционное борирование с последующим ЭЛЛ алюминием. Совмещенный процесс насыщения бором и алюминием (бороалитирование) позволяет синтезировать слои полифункционального назначения [14,15].

Данная статья содержит материалы по первому этапу обработки как самостоятельных процессов, повышающих комплекс физико-механических свойств сталей по всей площади изделия.

Цель настоящей работы заключается в установлении влияния борирования и алитирования на структуру и свойства диффузионного слоя на поверхности низкоуглеродистых сталей. В работе приведены результаты апробации низкотемпературных режимов ХТО и проведен сравнительный анализ структуры и свойств на примере двух марок сталей.

Методика исследований

В качестве насыщающих смесей использовались порошкообразные материалы: карбид бора B_4C марки F-220, алюминиевый порошок марки ПА-4 (ГОСТ 6058-73), оксид алюминия Al_2O_3 чда (ГОСТ 8136-85), натрий фтористый NaF чда (ГОСТ 4463-76).

Для процесса борирования использовалась смесь 96 % B_4C + 4 % NaF. Смесь для алитирования состояла из 48 % Al (порошок) + + 48 % Al_2O_3 + 4 % NaF.

Процессы ХТО в порошках проводились в лабораторной печи ПМ-16П-ТД при температуре 900 °С. ХТО подверглись образцы из сталей Ст3 и штамповой стали 3Х2В8Ф размером 20×20×10 мм. Продолжительность процесса

обработки составляла 2 ч. Сталь Ст3 применятся в несущих элементах сварных и несварных конструкций и деталей (состав, в % (весовых): Fe ≈ 97, C 0,14…0,22, Si 0,15…0,3, Mn 0,4…0,65). Сталь 3Х2В8Ф применяется в тяжелонагруженном прессовом инструменте при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов (состав, в % (весовых): Fe ≈ 87, C 0,3…0,4, Si 0,15…0,4, Mn 0,15…0,4, Cr 2,2…2,7, W 7,5…8,5, V 0,2…0,5, Mo до 0,5). Порошковая смесь засыпалась в тигель вместе с исследуемыми образцами, далее тигель упаковывался и герметизировался сверху плавким затвором. Охлаждение тиглей проводилось на открытом воздухе при комнатной температуре. Далее тигли вскрывались, образцы зачищались от остатков насыщающей смеси.

Состав и структуру диффузионного слоя определяли на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL (Япония) с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments (Великобритания) в ЦКП «Прогресс» ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления.

Фазовый состав на поверхности образцов определялся на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker AXS в медном излучении с интервалом съемки 10…70° в ЦКП БИП СО РАН.

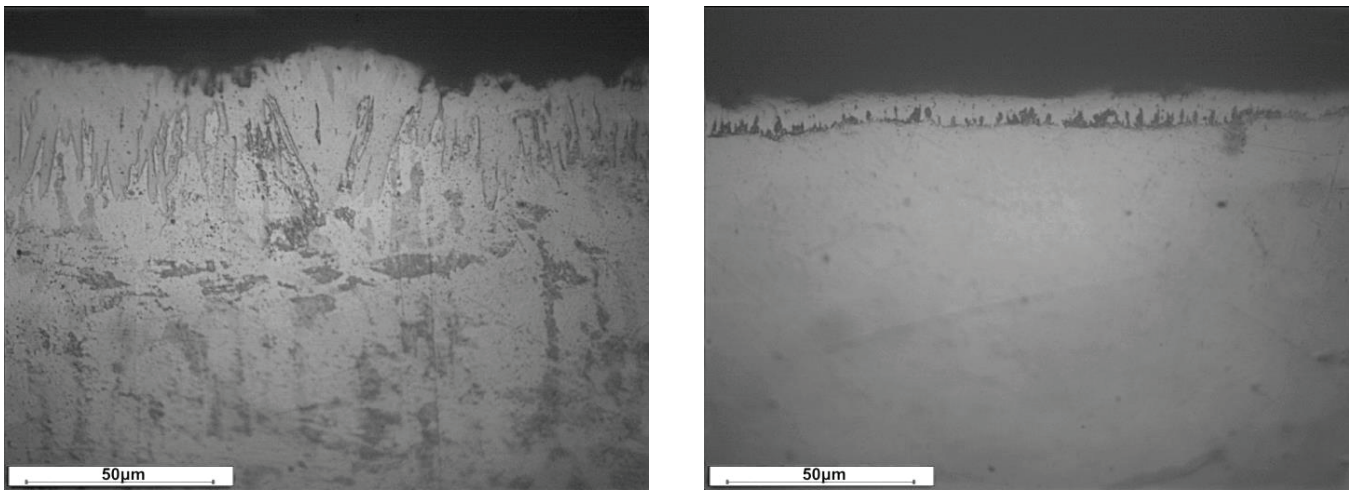
Определение микротвердости насыщенных слоев осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3М. Нагрузка составляла 50 г. Для расчета микротвердости применялся программный комплекс Nexsys ImageExpert MicroHandness 2 (ГОСТ 9450–76). Снимки микроструктур были сделаны с помощью металлографического микроскопа «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «Altami Studio» (Россия). Для определения толщины диффузионного слоя использовали программный комплекс Nexsys ImageExpert Pro 3.0.

Результаты и их обсуждение

Процессы борирования и алитирования проводились на образцах стали Ст3 и 3Х2В8Ф при температуре 900 °С с выдержкой 2 ч.

На рис. 1 и 2 представлены микрофотографии структуры сталей после ХТО.

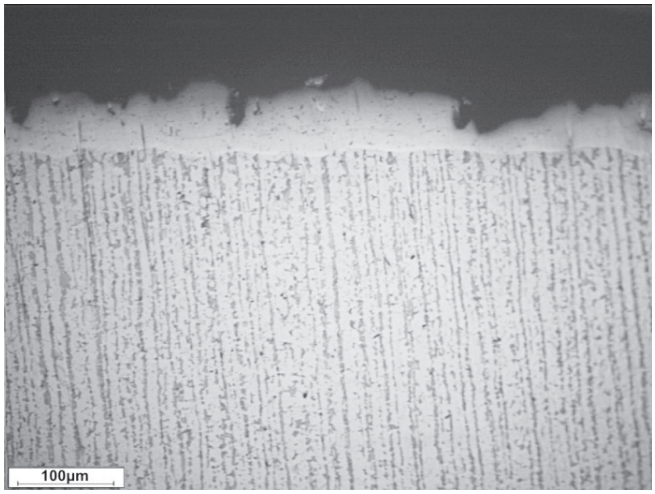
На рисунках отчетливо видна характерная для борированных слоев игольчатая структура. Толщина полученного диффузионного слоя на Ст3 составляет 35 мкм, а на легированной стали – 15 мкм. Известно, что борирование низкоуглеродистой стали при тех же температурно-временных режимах в металлотермических смесях (на основе оксидов бора и алюминия) обеспечивает толщину слоя 50 мкм [16]. На стали 3Х2В8Ф образовался слой гораздо меньшей толщины по сравнению с низкоуглеродистой сталью. Это связано с высокой концентрацией легирующих элементов, затрудняющих диффузию бора. Полученный слой сопоставим по толщине с борированными слоями, полученными жидкостным методом и в пастах различного состава [16].

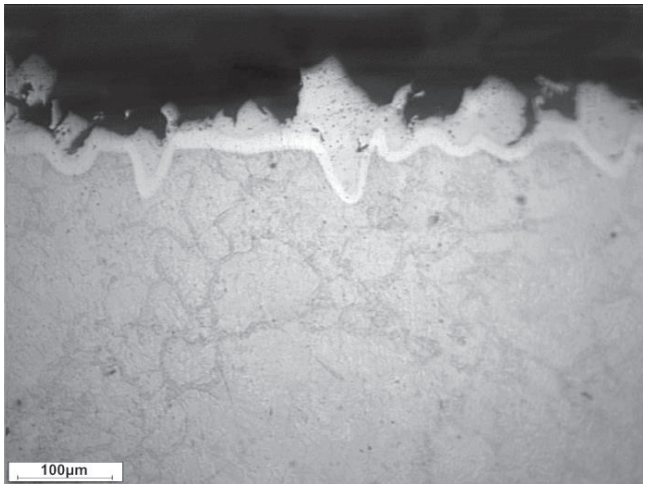


а *б*

Рис. 1. Микроструктуры стали Ст3 (*а*) и 3Х2В8Ф (*б*) после борирования

Fig. 1. Microstructures of *St3* (*a*) and *3Cr2W8V* (*б*) steels after boriding





а *б*

Рис. 2. Микроструктуры стали Ст3 (*а*) и 3Х2В8Ф (*б*) после алитирования

Fig. 2. Microstructures of *St3* (*a*) and *3Cr2W8V* (*б*) steels after aluminizing

На рис. 2, *а*, *б* показаны структуры исследуемых сталей после алитирования. На стали Ст3 образовался более ровный поверхностный слой, состоящий в основном из Al_5Fe_2. На границе с основным металлом образуются по мере удаления от поверхности фазы AlFe, $AlFe_3$ и твердый раствор в α-Fe [17–19]. Толщина диффузионного слоя на стали Ст3 равна 65 мкм, что сопоставимо со слоями, полученными алитированием, напылением и в расплавах солей (гальванический способ) [17].

На образце из стали 3Х2В8Ф виден слой средней толщины 50 мкм с неравномерной границей раздела с основным металлом. Локальные участки экстремумов толщины слоя, по-видимому, являются местами проплавления поверхности стали и частичного перехода в жидкое состояние на данных участках, что также сопровождается повышенной диффузией пропорционально повышению температуры. Последнее может быть вызвано прохождением экзотермической реакции восстановления металлов. При этом фазовый состав аналогичен составу на углеродистой стали Ст3, где алюминиды железа дополнительно легированы Cr, W и V.

Низкое качество поверхности после алитирования связано с высокой реакционной способностью алюминия, сопровождающейся взаимодействием с кислородом и другими элементами атмосферного воздуха [20].

На рис. 3 показана диаграмма распределения микротвердости по глубине после процесса борирования для обеих сталей.

Максимальная микротвердость для стали Ст3 наблюдается на поверхности слоя и на глубине до 10…15 мкм и достигает 1919,6 HV, что характерно для борирования за счет образования твердых боридов железа. На стали 3Х2В8Ф максимальное значение (1684,8 HV) наблюдается на глубине 15 мкм от поверхности, вероятно, в зоне с самой высокой концентрацией боридов.

На рис. 4 представлена диаграмма распределения микротвердости по глубине после процесса алитирования для обеих сталей.

Интерес вызывают полученные диаграммы распределения микротвердости после процесса алитирования для стали 3Х2В8Ф. Максимальное значение микротвердости для Ст3 составило 996 HV, а для стали 3Х2В8Ф оно достигло достаточно высоких показателей – 1119 HV. На данной диаграмме присутствует характерное увеличение микротвердости на глубине 150…180 мкм от поверхности. Локальное увеличение микротвердости соответствует переходной зоне непосредственно под слоем, что может указывать на повышенное содержание карбидов хрома и вольфрама. Повышение концентрации последних является результатом их вытеснения диффундирующим с поверхности алюминием. Вытеснение карбидов в глубь основного

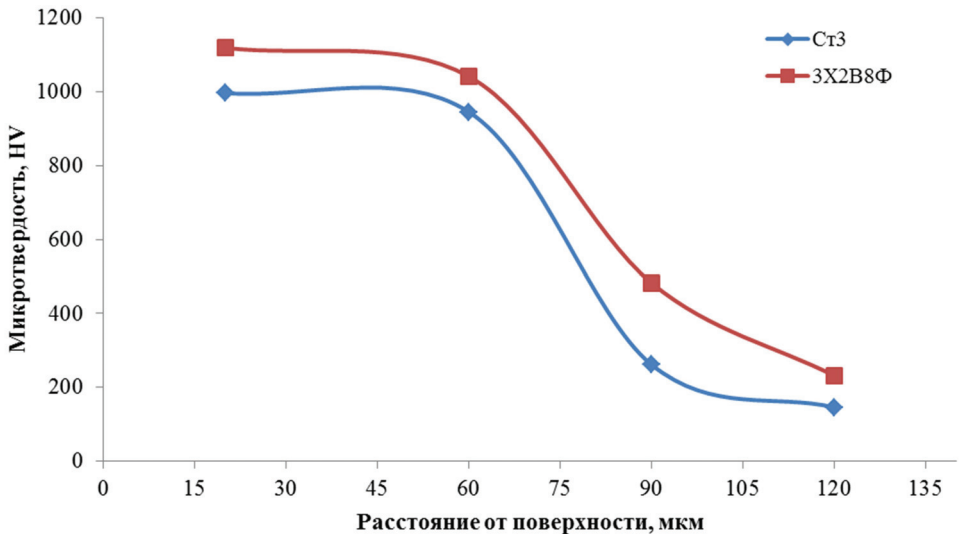


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине слоя на сталях после борирования

Fig. 3. Microhardness distribution over the layer depth on steels after boriding

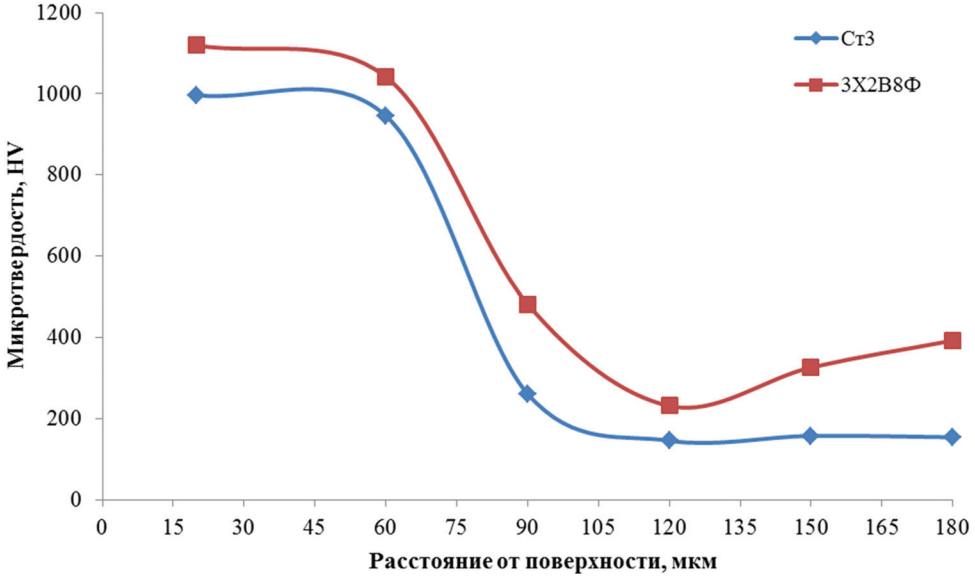


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине слоя на сталях после алитирования

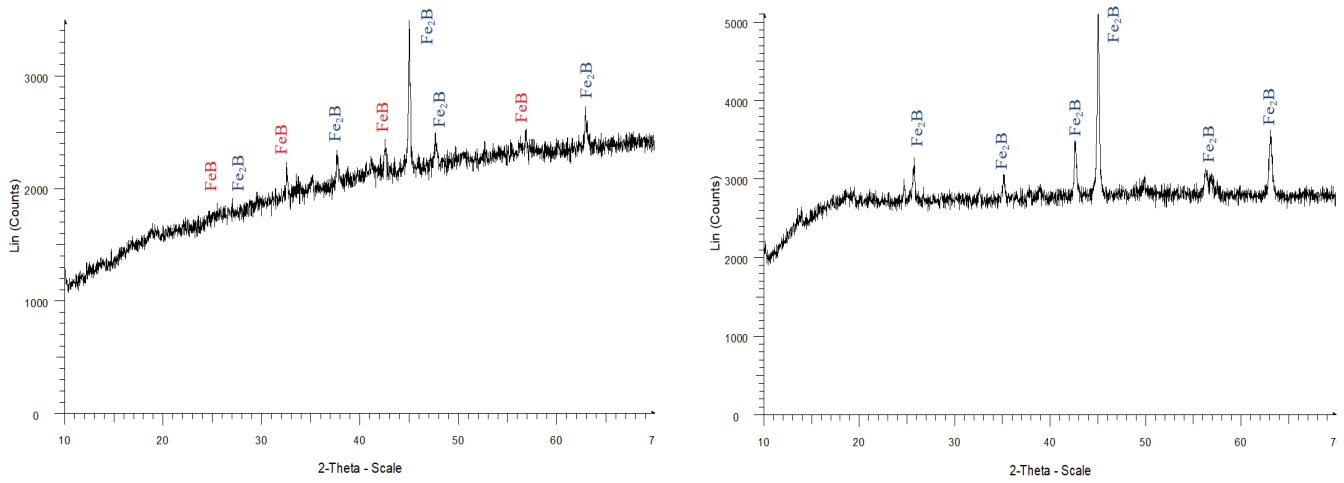
Fig. 4. Microhardness distribution over the layer depth on the steels after aluminizing

металла связано с их взаимной нерастворимостью с алюминидами [21].

Образцы после ХТО были направлены на РФА для определения фазового состава поверхностного диффузионного слоя. На рис. 5, *а* изображена рентгенограмма при борировании стали Ст3, на поверхности образуются фазы FeB и Fe_2B. При борировании стали 3Х2В8Ф (рис. 5, *б*) образуется только фаза Fe_2B.

На рис. 6, *а* представлена рентгенограмма после процесса алитирования стали Ст3, на поверхности образуются фазы Al_5Fe_2, Na_3AlF_6, Al_2O_3. При алитировании стали 3Х2В8Ф идентифицируются фазы Al_5Fe_2, Na_3AlF_6, Al_2O_3.

Дальнейшие исследования заключались в определении содержания B и Al в диффузионном слое и переходных зонах. На рис. 7, *а* показано распределение B для Ст3 и 3Х2В8Ф со-



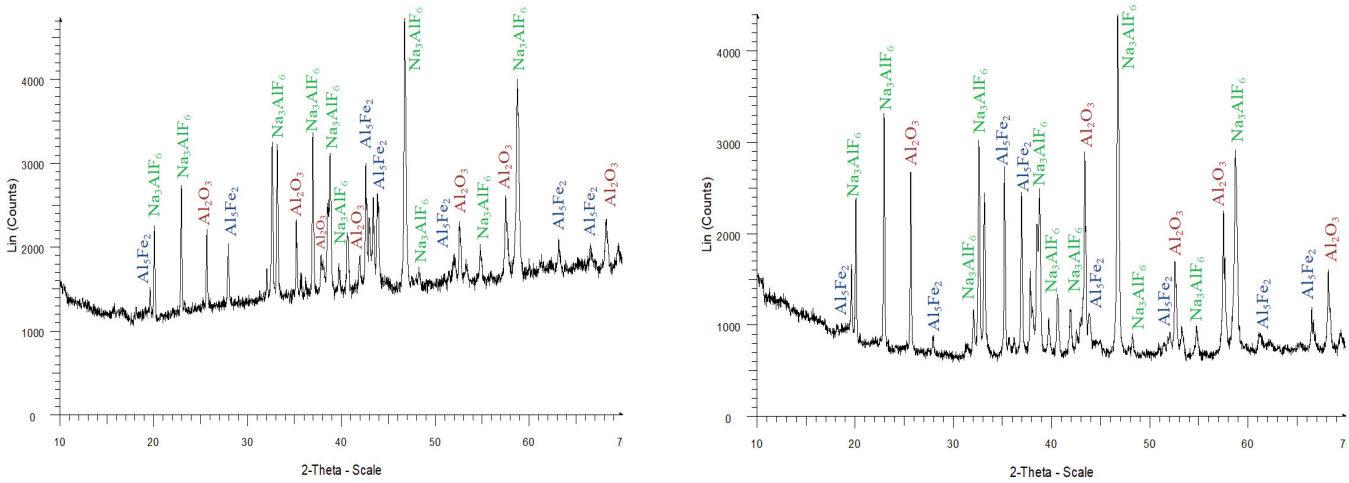
а *б*

Рис. 5. Рентгенограммы поверхности после борирования:

а – Ст3; *б* – 3Х2В8Ф

Fig. 5. XRD-pattern of the surface after boriding:

а – St3; *б – 3Cr2W8V*



а *б*

Рис. 6. Рентгенограммы поверхности сталей после алитирования:

а – Ст3; *б* – 3Х2В8Ф

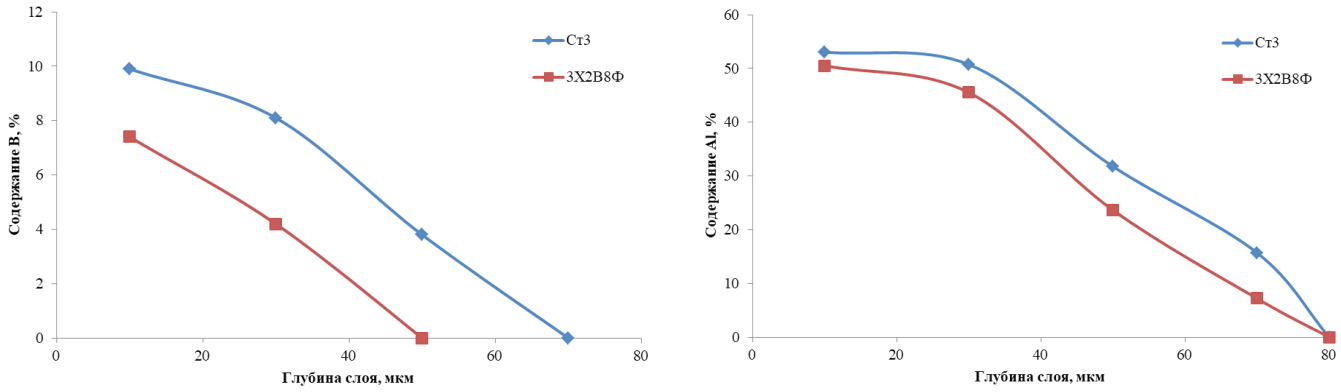
Fig. 6. XRD-pattern of the steel surface after aluminizing:

а – St3; *б – 3Cr2W8V*

ответственно. На рис. 7, *б* представлен график распределения Al. Из полученных диаграмм видно, что при борировании в одинаковых условиях содержание бора в диффузионном слое на Ст3 несколько больше (на 1–2 %) и зависит от глубины слоя для обеих сталей (см. рис. 7, *а*). Похожая картина наблюдается при алитировании исследуемых образцов. На стали Ст3 содержание алюминия выше на 2...7 % в зависимости от глубины слоя (см. рис. 7, *б*). Установлено, что для стали 3Х2В8Ф в местах проплавления основного металла содержание алюминия на 3…5 % выше, чем в основном слое.

Выводы

На основании выполненных исследований установлено, что при температуре процесса 900 °С и выдержке в течение двух часов после борирования на поверхности обеих сталей об-



а *б*

Рис. 7. Распределение бора и алюминия по глубине слоя на сталях после борирования (*а*) и алитирования (*б*) соответственно

Fig. 7. Distribution of boron and aluminum over the layer thickness on the steels after boriding (*a*) and aluminizing (*б*) respectively

разуются бориды железа. При этом на стали Ст3 рентгенофазовым анализом (РФА) обнаружено два борида FeB и Fe_2B, а на стали 3Х2В8Ф – только фаза Fe_2B. После алитирования обеих сталей образуются алюминийсодержащие фазы, такие как Al_5Fe_2, Na_3AlF_6 и Al_2O_3. Толщина полученного диффузионного слоя на легированной стали меньше, чем на углеродистой стали, что связано с влиянием легирующих элементов, тормозящих диффузию бора и алюминия. Максимальная микротвердость наблюдается на стали Ст3, она составляет 1920 HV после борирования, что объясняется присутствием в ее составе двух боридов железа, на стали 3Х2В8Ф максимальное значение микротвердости достигло 1620 HV. Микротвердость после алитирования сопоставима для обеих сталей, она равна 1000…1100 HV.

Список литературы

1. *Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А.* Теория и технология химико-термической обработки. – М.: Новое знание, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-94735-149-1.

2. Kulka M. Trends in thermochemical techniques of boriding // Kulka M. Current trends in boriding: Techniques. – Cham, Switzerland: Springer, 2019. – P. 17–98. – (Engineering materials). – DOI: 10.1007/978-3-030-06782-3_4.

3. *Atul S.C., Adalarasan R., Santhanakumar M.* Study on slurry paste boronizing of 410 martensitic stainless steel using taguchi based desirability analysis (TDA) // International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 5. – P. 64–77. – DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.

4. *Nakajo H, Nishimoto A.* Boronizing of CoCrFeMnNi high-entropy alloys using spark plasma sintering // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – Vol. 6. – P. 29. – DOI: 10.3390/jmmp6020029.

5. *Campos-Silva I.E., Rodriguez-Castro G.A.* Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels // Thermochemical Surface Engineering of Steels. – 2015. – Vol. 62. – P. 651–702. – DOI: 10.1533/9780857096524.5.651.

6. Effect of aluminizing and oxidation on the thermal fatigue damage of hot work tool steels for high pressure die casting applications / M. Salem, S. Le Roux, G. Dour, P. Lamesle, K. Choquet, F. Rézaï-Aria // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 119. – P. 126–138. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.018.

7. Formation and phase transformation of aluminide coating prepared by low-temperature aluminizing process / Y. Sun, J. Dong, P. Zhao, B. Dou // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 330. – P. 234–240. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.025.

8. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом / В.И. Шин, П.В. Москвин, М.С. Воробьев, В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 2. – С. 69–75. – DOI: 10.31857/S0032816221020191.

9. Разработка физических основ комплексного электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий / Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Е.А. Петрикова, О.В. Крысина, В.В. Шугуров, Ю.Х. Ахмадеев, И.В. Лопатин, А.Д. Тересов, О.С. Толкачев // Наукоемкие технологии в проектах РНФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье, Ю.П. Шаркеева. – Томск, 2017. – Гл. 1. – С. 5–35. – ISBN 978-5-89503-607-5.

10. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 298 с. – ISBN 978-5-89503-577-1.

11. *Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P.* The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. – Vol. 11. – P. 45–46.

12. *Zenker R.* Electron beam surface technologies // Encyclopedia of Tribology / Q.J. Wang and Y.-W. Chung (Eds.). – Boston, MA: Springer, 2013. – ISBN 978-0-387-92898-2. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_723.

13. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser / A. Bartkowska, D. Bartkowski, D. Przestacki, J. Hajkowski, A. Miklaszewski // Coatings. – 2021. – Vol. 11. – P. 608. – DOI: 10.3390/coatings11050608.

14. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhiyn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // Lubricants. – 2020. – Vol. 8, iss. 3. – P. 26. – DOI: 10.3390/lubricants8030026.

15. *Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С.* Влияние механоактивации порошковой смеси на структуру и свойства бороалитированных малоуглеродистых сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 151–162. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-151-162.

16. *Рябов В.Р.* Алитирование стали. – М.: Металлургия, 1973. – 240 с.

17. *Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Понкратова Г.В.* О влиянии алитирования на структуру и свойства стали Ст3 // Известия ВолгГТУ. – 2014. – № 9. – С. 30–34.

18. *Скориков А.В., Ульяновская Э.В.* Кинетика процесса поверхностного алитирования порошковых сталей // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 3 (199). – С. 134–139. – DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-134–139.

19. Структура и фазовый состав защитных покрытий на стали, полученных методами жидкофазного алитирования / И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, Ю.П. Зайков, В.А. Ковров, Ю.М. Штефанюк, В.В. Пингин, Д.А. Виноградов, М.В. Голубев, Т.И. Яблонских, В.В. Астафьев // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 9. – С. 928–936. – DOI: 10.7868/S0015323015090041.

20. *Jurči P., Hudáková M.* Diffusion boronizing of H11 hot work tool steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2011. – Vol. 20. – P. 1180–1187. – DOI: 10.1007/s11665-010-9750-x.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2022 vol. 24 no. 2 pp. 91–101
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Influence of boriding and aluminizing processes on the structure and properties of low-carbon steels

Pavel Gulyashinov [1, a, *], ***Undrakh Mishigdorzhiyn*** [2, b], ***Nikolay Ulakhanov*** [3, 2, c]

[1] Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation
[2] Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation
[3] East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya str, Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-6776-9314, gulpasha@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-7863-9045, undrakh@ipms.bscnet.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-0635-4577, nulahanov@mail.ru.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 March 2021
Revised: 06 April 2021
Accepted: 27 April 2021
Available online: 15 June 2021

Keywords:
Thermochemical treatment (TCT)
Boriding
Aluminizing
Boron carbide
Aluminum
Carbon steel
Alloy steel

Funding
The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 19-79-10163).

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

ABSTRACT

Introduction. Boriding and aluminizing are among the effective methods for improving the performance properties (corrosion resistance, heat resistance and wear resistance) of machine parts and tools. Solid-phase methods of carrying out techniques of thermochemical treatment (*TCT*) require long-term exposure at elevated temperatures, which negatively affects the structure and properties of the base material. From these positions, the selection of reasonable temperature-time parameters of solid-phase boriding and aluminizing processes is an urgent task. **The purpose of this work** is to assess the effect of low-temperature boriding and aluminizing processes on the structure and microhardness of diffusion layers on the surface of low-carbon steels. The paper considers two grades of steels with a carbon content of up to 0.4 %: low-carbon steel *St3* and alloy steel *3Cr2W8V*. The use of the second steel is due to the need to identify the effect of alloying elements in steel on the thickness of diffusion layers and its composition. Powder mixtures based on boron carbide and aluminum carbide are selected as sources of boron and aluminum. **Results and discussions.** It is found at a process temperature of 900 °C and holding for 2 hours after boriding, iron borides are formed on the surface of both steels. At the same time, two borides *FeB* and Fe_2B are detected on *St3* steel by X-ray phase analysis (*XRD*), and only the Fe_2B phase is detected on *3Cr2W8V* steel. After aluminizing, aluminum-containing phases such as Al_3Fe_2, Na_3AlF_6 and Al_2O_3 are formed in both steels. The thickness of the resulting diffusion layer on St3 after boriding is 35 µm, after aluminizing – 65 µm. The thickness of the diffusion layer on *3Cr2W8V* steel is equal to 15 µm after boriding and 50 µm after aluminizing, which is significantly less than on carbon steel and is obviously due to the effect of alloying elements. It is established that TCT leads to a significant increase in the microhardness of the samples surface. Thus, the maximum microhardness of *St3* steel increased to 2,000 HV, and the maximum microhardness of *3Cr2W8V* steel increased to 1,700 HV after boriding. The microhardness after aluminizing is comparable for both steels and is equal to 1,000–1,100 HV. Elemental analysis of the upper sections of the diffusion layers shows that the content of boron (7–9 %) and aluminum (50–53 %) corresponds to the detected *XRD* iron borides and aluminides. In all cases, there is a gradual decrease in the diffusing elements in the direction from the surface to the base.

For citation: Gulyashinov P.A., Mishigdorzhiyn U.L., Ulakhanov N.S. Influence of boriding and aluminizing processes on the structure and properties of low-carbon steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 91–101. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101. (In Russian).

References

1. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and technology of chemical and heat treatment]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-94735-149-1.

*** Corresponding author**
Gulyashinov Pavel A., Ph.D. (Engineering), Scientific Associate
Baikal Institute of Nature Management Siberian
branch of the Russian Academy of sciences
6 Sakhyanovoy str.,
670047, Ulan-Ude, Russian Federation
Tel.: 8 (3012) 43-36-76, **e-mail:** gulpasha@mail.ru

2. Kulka M. Trends in thermochemical techniques of boriding. Kulka M. *Current trends in boriding: Techniques*. Cham, Switzerland, Springer, 2019, pp. 17–98. DOI: 10.1007/978-3-030-06782-3_4.

3. Atul S.C., Adalarasan R., Santhanakumar M. Study on slurry paste boronizing of 410 martensitic stainless steel using taguchi based desirability analysis (TDA). *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2015, vol. 5, pp. 64–77. DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.

4. Nakajo H, Nishimoto A. Boronizing of CoCrFeMnNi high-entropy alloys using spark plasma sintering. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, vol. 6, p. 29. DOI: 10.3390/jmmp6020029.

5. Campos-Silva I.E., Rodriguez-Castro G.A. Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*, 2015, vol. 62, pp. 651–702. DOI: 10.1533/9780857096524.5.651.

6. Salem M., Le Roux S., Dour G., Lamesle P., Choquet K., Rézaï-Aria F. Effect of aluminizing and oxidation on the thermal fatigue damage of hot work tool steels for high pressure die casting applications. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 119, pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.018.

7. Sun Y., Dong J., Zhao P., Dou B. Formation and phase transformation of aluminide coating prepared by low-temperature aluminizing process. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 330, pp. 234–240. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.025.

8. Shin V.I., Moskvin P.V., Vorobyev M.S., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Yu., Koval' N.N. Povyshenie elektricheskoi prochnosti uskoryayushchego zazora v istochnike elektronov s plazmennym katodom [Increasing the electrical strength of the accelerating gap in an electron source with a plasma cathode]. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and Experimental Techniques*, 2021, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.31857/S0032816221020191.

9. Ivanov Yu.F., Koval' N.N., Petrikova E.A., Krysina O.V., Shugurov V.V., Akhmadeev Yu.Kh., Lopatin I.V., Teresov A.D., Tolkachev O.S. Razrabotka fizicheskikh osnov kompleksnogo elektronno-ionno-plazmennogo inzhiniringa poverkhnosti materialov i izdelii [Development of the physical foundations of complex electron-ion-plasma engineering of the surface of materials and products]. *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir'* [High technologies in RSF projects. Siberia]. Tomsk, NTL Publ., 2017, ch. 1, pp. 5–35. ISBN 978-5-89503-607-5.

10. Koval' N.N., Ivanov Yu.F., eds. *Evolyutsiya struktury poverkhnostnogo sloya stali, podvergnutoi elektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki* [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods]. Tomsk, NTL Publ., 2016. 298 p. ISBN 978-5-89503-577-1.

11. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, vol. 11, pp. 45–46.

12. Zenker R. Electron beam surface technologies. *Encyclopedia of Tribology*. Wang Q.J, Chung Y.-W. (Eds.). Boston, MA, Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_723.

13. Bartkowska A., Bartkowski D., Przestacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*, 2021, vol. 11, p. 608. DOI: 10.3390/coatings11050608.

14. Mishigdorzhiyn U., Chen Y., Ulakhanov N., Liang H. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing. *Lubricants*, 2020, vol. 8, iss. 3, p. 26. DOI: 10.3390/lubricants8030026.

15. Gulyashinov P.A., Mishigdorzhiyn U.L., Ulakhanov N.S. Vliyanie mekhanoaktivatsii poroshkovoi smesi na strukturu i svoistva boroalitirovannykh malouglerodistykh stalei [Effect of mechanical activation of the powder mixture on the structure and properties of boro-aluminized low-carbon steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 151–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-151-162.

16. Ryabov V.R. *Alitirovanie stali* [Aluminizing steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 240 p.

17. Danenko V.F., Gurevich L.M., Ponkratova G.V. O vliyanii alitirovaniya na strukturu i svoistva stali St3 [On the effect of aluminizing on the structure and properties of steel St3]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2014, no. 9, pp. 30–34.

18. Skorikov A.V., Ul'yanovskaya E.V. Kinetika protsessa poverkhnostnogo alitirovaniya poroshkovykh stalei [Kinetics of the process of surface aluminizing of powder steels]. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2018, no. 3 (199), pp. 134–139. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-134-139.

19. Brodova I.G., Shirinkina I.G., Zaikov Yu.P., Kovrov V.A., Shtefanyuk Yu.M., Pingin V.V., Vinogradov D.A., Golubev M.V., Yablonskikh T.I., Astaf'ev V.V. Struktura i fazovyi sostav zashchitnykh pokrytii na stali, poluchennykh metodami zhidkofaznogo alitirovaniya [Structure and phase composition of protective coatings on steel obtained by liquid-phase aluminizing]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 9, pp. 928–936. DOI: 10.7868/S0015323015090041.

20. Jurči P., Hudáková M. Diffusion boronizing of H11 hot work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, pp. 1180–1187. DOI: 10.1007/s11665-010-9750-x.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/).

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Оформление статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «*Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*», должно соответствовать *по стилю и содержанию* требованиям журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules. Статьи, не соответствующие этим требованиям, отклоняются и не рассматриваются редакционным советом. Кроме того, текст работы должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно.

Избегайте:

• неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

• длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь структуру ***IMRAD*** (***Introduction, Methods, Results And Discussion***):

• название (*Title*);
• аннотация (*Abstract*);
• введение (***I****ntroduction*);
• методы (***M****ethods*);
• результаты (***R****esults*);
• обсуждение (***D****iscussion*);
• заключение (*Conclusion*);
• благодарности, финансирование (*Acknowledgements* / *Funding*);
• список литературы (*References*).

ЗАГЛАВИЕ

Название должно отражать основную идею выполненного исследования и быть по возможности кратким.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны имя и фамилия автора (ов). Ниже – 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*) и электронная почта (***e-mail***). 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.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Указывается индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Для англоязычной части статьи УДК указывать не надо.

Ключевые слова

Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний) должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

АННОТАЦИЯ (РЕФЕРАТ)

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200…250 слов. **Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!** Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ

Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подход, данные или анализ). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию обозначенной проблемы. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

МЕТОДЫ / МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

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 Государственному стандарту.

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 прочее; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Раздел, содержащий 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).

Рекомендации, перечисленные выше, 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 выявления причинно-следственных связей не украшают 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, а также для упорядочения и интерпретации результатов. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и обозначить 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

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список цитируемой литературы включает в себя 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). Правила оформления англоязычного блока статьи представлены на сайте журнала в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

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.

Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНИТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в авторском резюме не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее 100–250 слов (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического

планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из девяти последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на базе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменяемости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via 1H or 31P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative 13C-glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by 31PMR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.

2. Кратко излагая основные факты работы, помните следующие моменты:

– следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

– не включать несущественные детали;

– вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение, а также имейте в виду, что вы пишете для международной аудитории;

– текст должен быть связным, с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example»,» the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого;

– необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);

– стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые Авторы, внимательно ознакомьтесь с правилами оформления статьи на сайте журнала!

ШАБЛОН ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Синим цветом обозначены пояснения относительно того, что именно и как должно быть написано в данном разделе / подразделе.

После внесения соответствующих правок в разделы статьи необходимо удалить синие подсказки. В шаблон следует поместить все материалы и данные, которые, по вашему мнению, должны быть напечатаны в журнале (в том числе рисунки и таблицы). Заполненный шаблон статьи следует сохранить на компьютере и загрузить на сайт журнала.

Структурные особенности плазменных покрытий B_4C-Ni-P

(Заглавие статьи на русском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Елена Корниенко [1, a,*], ***Виктор Кузьмин*** [2, b], ***Александр Сивков*** [3, c]

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

[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] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

[a] http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, kornienko_ee@mail.ru, [b] http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, vikuzmin57@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) 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)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71 *(Указывается индекс универсальной десятичной классификации)*

История статьи:
Поступила: 1 июня 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: работа должна поступить не позже 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.)*
Рецензирование: *(Дата указывается редакцией)*
Принята к печати: *(Дата указывается редакцией)*
Доступно онлайн: *(Дата указывается редакцией)*

Ключевые слова:
Плазменное напыление,
Карбид бора,
B_4C-Ni-P,
Покрытие.
(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

АННОТАЦИЯ

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **200…250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Для цитирования: *Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Сивков А.А.* Структурные особенности плазменных покрытий B_4C-Ni-P // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 30–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50.

(Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

***Адрес для переписки**
Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-11-71, **e-mail:** kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

Основная часть статьи

1. Введение

До двух страниц краткий обзор литературы по проблеме исследования, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована **цель** и **задачи** исследований.

2. Методика исследований

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).

3. Результаты и их обсуждение

Раздел, содержащий 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).

Рекомендации по набору текста

Текст набирается в русифицированном редакторе Microsoft Word. Формат оригиналов – А4. Старайтесь использовать только следующие шрифты: Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв. Размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст статьи.

Не используйте более одного пробела – применяйте абзацные отступы и табуляцию.

Не заканчивайте строку нажатием клавиши «Enter» – используйте ее только для начала нового абзаца.

Реализуйте возможности, предоставляемые текстовым редактором: автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т. п.

Не набирайте кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами, и наоборот.

Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев.

Недопустимо тире «–» заменять дефисом «-».

В тексте и формулах (в том числе в индексах) латинские буквы набираются курсивом, а греческие и русские – прямым шрифтом.

Десятичные цифры в русскоязычных текстах набираются через запятую (0,5), а в англоязычных – через точку (0.25 вместо 0,25).

Рекомендации по набору формул

Формулы, структурные химические формулы и схемы располагаются по месту в тексте статьи.

Знаки *, ′, ±, одиночные буквы греческого алфавита, одиночные наклонные или полужирные буквы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения, цифры в тексте, а также простые математические или химические формулы (например, $a^2 + b^2 = c^2$, H_2SO_4) должны набираться в текстовом режиме **без использования редактора формул.**

Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться с использованием редактора формул (Microsoft Equation). Набор формул из составных элементов, где часть формулы – таблица, часть – текст, часть – внедренная рамка, не допускается.

Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения. Их принудительное ручное изменение для отдельных символов или элементов формул не допускается!

Рекомендации по набору таблиц

Таблицы располагаются в тексте рукописи.

Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать ее **название** (**на русском и на английском языке!**).

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения. Например: *t*, °C; *V*, об.%; HV, МПа и т.п.

Сокращения слов в таблицах не допускаются.

Создавайте таблицы, используя возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы, набранные вручную с помощью пробелов или табуляций, не могут быть использованы.

Таблица
Table

Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия
The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

№ участка / No area	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0.08	86.55	13.03	0.3	0.02
2	57.71	22.73	8.22	2.12	9.22
3	40.37	44.53	10.23	2	2.87
4	49.65	25.69	13.10	3.23	8.33
5	44.26	26.06	7.35	9.36	12.97

Сокращения и аббревиатуры

Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

Сокращения из нескольких слов разделяются пробелами (760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр.), за исключением общеупотребительных (и т.д.; и т.п.; т.е.) и аббревиатур (РФА, КПД и т. п.).

Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: ИК-спектроскопия, ПЭ-пленка, ЖК-состояние, Na^+-форма, ОН-группа, но группа ОН.

Размерности

Размерности отделяются от цифры пробелом (17,5 моль/м^3 (17.5 mol/m$^{3)}$; 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с^2 ,20 °C, 50 %, 10 ‰), кроме угловых градусов (90°).

Точка после размерностей не ставится (с – секунда, г – грамм, сут – сутки, град – градус). В сложных размерностях обязательно указывается знак умножения (·): Н·м/с или кг/(с· м· Па).

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней: Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$ или J ·mol^{-1}·K^{-1}, так и скобок: J/(mol · K) или J · (mol · K)$^{-1}$, если это облегчает их прочтение.

Главное условие – соблюдение единообразия одинаковых размерностей по статье.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (10, 15 и 45 мин; от 18 до 20 мм; 30–40 Дж/моль), за исключением угловых градусов: 5°–10°, а не 5–10°.

Размерности переменных пишутся через запятую (*E*, Дж/моль или *E*, J/mol), а подлогарифмических величин – в квадратных скобках, без запятой: ln *t* [мин].

Точки и пробелы

Точка не ставится после названия статьи, списка авторов, списка организаций, заголовков и подзаголовков, названий таблиц и подрисуночных подписей.

Точка после сокращений не ставится в подстрочных индексах ($T_{пл}$ – температура плавления).

Ссылки на рисунки и таблицы набираются с пробелами (рис. 5, табл. 2).

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 300 К), (а).

Между знаком номера или параграфа и числом должен быть пробел (№ 1; § 5.5).

Числа с буквами в обозначениях набирают без пробелов (IVd; 1.3.14а; рис. 1, *а*).

В географических координатах широты отделяются пробелами: 56,5 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °Е.

В географических названиях после точки ставится пробел: р. Енисей, г. Новосибирск.

Требования к иллюстрациям

Иллюстрации и подписи к ним располагаются в тексте рукописи.

Иллюстрации нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (**на русском и на английском языке!**).

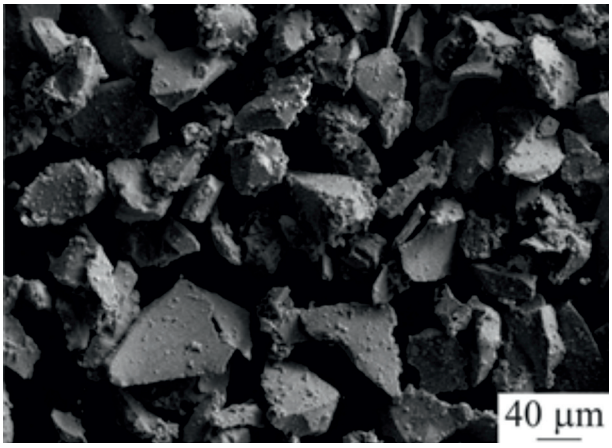


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка B_4C-Ni-P

Fig. 1. The particles of B_4C-Ni-P powder

Общие технические требования:

иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку) либо 17–17,5 см (на две колонки);

надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому для фотографий желательно предоставить второй вариант без текста и всех обозначений, для остальных иллюстраций – располагать надписи на иллюстрации так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

на фотографиях (например, структур) обязательно должны быть указаны размерные метки;

для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки;

графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;
- толщина линий должна быть не меньше 0,5 pt;

● векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как «Noise» «Black&white noise» «Top noise;

● для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

Штриховые иллюстрации и полутоновые иллюстрации:

– должны иметь разрешение не ниже 300 dpi;

комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

– должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4. Выводы

Выводы по результатам работы, описанным в данной статье, должны быть лаконичным.

Список литературы

Список цитируемой литературы включает в себя 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 языке (или других), 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).

Финансирование

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) …».

Конфликт интересов

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 использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем авторы статьи считают его значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Англоязычный блок статьи

Structure features of B_4C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Elena Kornienko [1, a,*], ***Viktor Kuz'min*** [2, b], ***Alexander Sivkov*** [3, c]

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

[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] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

[a] http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, kornienko_ee@mail.ru, [b] http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, vikuzmin57@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) 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.)

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 1 June 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже 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.)*
Revised: *(Дата указывается редакцией)*
Accepted: *(Дата указывается редакцией)*
Available online: *(Дата указывается редакцией)*

Keywords:
Plasma praying
Boron carbide
B_4C-Ni-P
Coating
(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

ABSTRACT

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

For citation: Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Sivkov A.A. Structure Features of B_4C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 30–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50. (in Russian)

(Авторами указывается примерная ссылка на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта)

* Corresponding author
Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 (383) 346-11-71, **e-mail:** kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

References

(Список используемой литературы на английском языке подготавливается согласно правилам, представленным на сайте журнала)

Funding *(Финансирование)*

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) …».

Conflicts of Interest (Конфликт интересов)

(Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть 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 использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest**».)

Acknowledgements (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.).

Сведения для РИНЦ

Раздел **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

[1]Корниенко Елена Евгеньевна, [2]Кузьмин Виктор Иванович, [3]Сивков Александр Анатольевич

[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]Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

Корниенко Е.Е. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, e-mail: kornienko_ee@mail.ru
Кузьмин В.И. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, e-mail: vikuzmin57@mail.ru
Сивков А.А. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Структурные особенности плазменных покрытий B_4C-Ni-P

Аннотация

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200…250 слов). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

УДК 621.793.71

Ключевые слова:
плазменное напыление, карбид бора, B_4C-Ni-P, покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed B_4C / H. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // Coating Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 1216-1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

(Список литературы оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.)

Финансирование статьи:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Дата поступления: 01.06.2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже 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.)*

Раздел **MATERIAL SCIENCE**

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

[1] Kornienko Elena E., [2] Kuz'min Viktor I., [3] Sivkov Alexander A.

[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] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Kornienko E.E. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, e-mail: kornienko_ee@mail.ru
Kuz'min V.I. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, e-mail: vikuzmin57@mail.ru
Sivkov A.A. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Structure features of B_4C-Ni-P plasma coatings

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Keywords:
Plasma praying, Boron carbide, B_4C-Ni-P, Coating

МАТЕРИАЛЫ СОУЧРЕДИТЕЛЕЙ

Внимание, инженеры и технические специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией, наладкой электроавтоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков, а также студенты и аспиранты профильных специальностей вузов, соучредитель журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)» ООО Научно-производственная коммерческая фирма «МАШСЕРВИСПРИБОР» готова предоставить свои страницы под рубрику «**Системы автоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков**».

В представляемых для данной рубрики статьях должны быть изложены проблемы и их решения в рамках следующих тем:

– системы ЧПУ;
– станочные электроприводы;
– датчики и элементы станочной электроавтоматики;
– модернизация систем автоматики и электроприводов;
– импортозамещение;
– автоматизация разработки технологических программ для станков с ЧПУ.

Преимуществом публикации будут пользоваться статьи, где отражены разработка и производство отечественных систем и элементов электроавтоматики, а также темы, посвященные импортозамещению. Для авторов статей под указанной выше рубрикой публикация является бесплатной.

Важно! Работа должна поступить не позднее, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях по согласованию с редакцией журнала срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели. Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы **Антиплагиат**. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %. Объем материалов рубрики в одном выпуске журнала не должен превышать трех печатных страниц журнала (15 000 знаков без пробелов).

Материалы для публикации принимаются ООО Научно-производственной коммерческой фирмой «МАШСЕРВИСПРИБОР» (e-mail: msp@chpu.ru). Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Внимание авторов! Материалы, поступившие от лица ООО Научно-производственной коммерческой фирмы «МАШСЕРВИСПРИБОР», не индексируются в Национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ – метаданные статей не подаются в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU. Кроме того, метаданные указанных материалов соучредителя не отправляются в международную базу ***Web of Science***.

Для опубликования материалов в основных рубриках журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)», индексируемых в РИНЦ и Web of Science, 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: 1. 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения, 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (в рамках группы научной специальности 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение); 2. 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 – Материаловедение (по отраслям) – (в рамках группы научной специальности

05.16.00 – Металлургия и материаловедение). ***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 основная часть статьи, без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 страниц. **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)»

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. ***Публикация статей бесплатная.***

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: **«Технология»**, **«Оборудование»**, **«Инструменты»**, **«Материаловедение»**, **«Научно-техническая информация»** и др.

В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI) базы Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.

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

РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др.)	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

- электронно-библиотечная система издательства «ЛАНЬ»;
- национальный цифровой ресурс «РУКОНТ».

График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

Адрес редакции журнала:
630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, корп. 5, к. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

+7 (383) 346-17-75

metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

С 2015 г. опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор - *Digital Object Identifier* (*DOI*). Метаданные каждой работы обязательно регистрируются в международном реестре научно-информационных материалов ***CrossRef***.

Журнал индексируется в зарубежных базах данных и агрегаторах:

- Emerging Sources Citation Index (ESCI) Web of Science Core Collection;
- EBSCO (core) в базе «Applied Science & Technology Source Ultimate»;
- Ulrich's Periodicals Directory;
- ICI Journals Master List
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

Журнал представлен:

- сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- база данных eLibrary.ru, журнал индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- реферативный журнал и база данных ВИНИТИ;

МЕРОПРИЯТИЯ

С 2014 г. научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ITE Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

- Инновационные технологии в машиностроении
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты
- Материаловедение в машиностроении
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении

Официальный сайт конференции:
http://machine-building.conf.nstu.ru/