

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 22, Номер 4

ОКТАБРЬ – ДЕКАБРЬ 2020

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

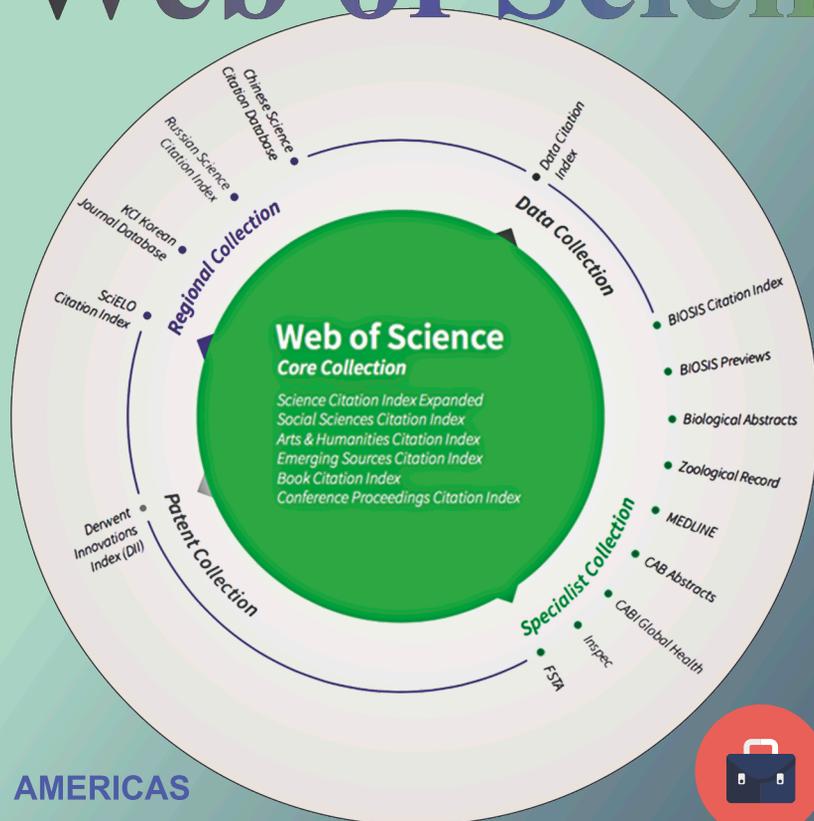
**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 22 № 4 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

Российская Федерация: **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген. директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **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 РАН, 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, **Рахимьянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **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

ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

*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 ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

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

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137ВЦ, Скиба В.Ю.

Тел. +7 (383) 346-17-75

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

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

Цена свободная

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Ардашев Д.В., Дюрягин А.А., Галимов Д.М. Экспериментальное исследование дефектного слоя на заготовках, выращенных DMD-методом.....	6
Удалов А.В. Границы применимости метода разрывных решений в исследовании процессов волочения труб.....	18
Марков А.М., Некрасов В.Н., Су Ц., Салман А.М., Гайст С.В., Андреев М.В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании.....	31
Шеладия М.В., Ачарья Ш.Г., Ачарья Г.Д. Технологическое исследование влияния параметров механической обработки на срок службы инструмента.....	41

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов.....	54
Васильев С.А., Алексеев В.В., Васильев М.А., Федорова А.А. Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования.....	71
Чернухин Р.В., Долгушин А.А., Касимов Н.Г., Иванцовский В.В., Лобанов Д.В., Васильев С.А., Мартюшев Н.В. Обоснование расходных характеристик рекуператора для тепловой подготовки агрегатов машин и оборудования.....	82

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Захарченко К.В., Капустин В.И., Ларичкин А.Ю., Лукьянов Я.Л. Влияние технологии горячего формообразования плит из алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) на сопротивление усталостному разрушению.....	94
Иванов А.Н., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Бакшаев В.А., Ивашкин И.Н. Влияние режима сварки трением с перемешиванием и ее направления относительно направления прокатки сплава Д16 на структуру и свойства его сварных соединений.....	110
Гусарова А.В., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Бакшаев В.А., Никитин Ю.В. Влияние направления проката АМг5 на микроструктуру и свойства сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием.....	124
Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Терюкалова Н.В., Белый А.В. Многофазные покрытия Cu-Ti, нанесенные плазменным вакуумно-дуговым напылением на Cu-Be сплав С17200.....	137
Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С. Влияние механоактивации порошковой смеси на структуру и свойства бороалитированных малоуглеродистых сталей.....	151

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Рекомендации по написанию научной статьи	163
Подготовка аннотации	166
Правила для авторов	169

Корректор *Е.Е. Татарникова*
 Художник-дизайнер *А.В. Ладыжская*
 Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

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

Подписано в печать 03.12.2020. Выход в свет 15.12.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 22,0. Уч.-изд. л. 40,92. Изд. № 213. Заказ 5. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA OMETALLOV

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 22 No.4 2020 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 “VNIINSTRUMENT”, *Moscow*;

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

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

Aleksandr N. 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*;

Kharis M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

Ardashev D.V., Dyuryagin A.A., Galimov D.M. Experimental Study of the Defect Layer on Workpieces, grown by the DMD method.....	6
Udalov A.V. The Limits of Applicability of the Method of Discontinuous Solutions in the Study of Pipe Drawing Processes.....	18
Markov A.M., Nekrasov V.N., Su J., Salman A.M., Gayst S.V., Andreev M.V. Technological Assurance of Fiberglass Composites Surface Layer Quality during End Milling.....	31
Sheladiya M.V., Acharya S.G., Acharya G.D. Technological investigation of effect of machining parameter on tool life.....	41

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of Cutting Dynamic on the Selection of the Technological Regimes to Ensure Minimal Wear of Cutting Tools.....	54
Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Vasiliev M.A., Fedorova A.A. Development and Research of a Profile Recorder for Measuring Deviations in the Shape of the Surface of Products by Laser Spiral Scanning.....	71
Chernukhin R.V., Dolgushin A.A., Kasimov N.G., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Vasiliev S.A., Martyushev N.V. Justification of the Flow Characteristics of the Recuperator for the Thermal Preparation of Machinery and Equipment Units.....	82

MATERIAL SCIENCE

Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Larichkin A.Yu., Lukyanov Ya.L. Influence of Technology of Hot Forming of Plates from Aluminum Alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on Resistance to Fatigue Fracture.....	94
Ivanov A.N., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Bakshaev V.A., Ivashkin I.N. Effect of Friction Stir Welding Mode and its Direction Relative to the Rolling Direction of 2024 Alloy on the Structure and Mechanical Properties of its Weld Joints.....	110
Gusarova A.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Bakshaev V.A., Nikitin Yu.V. The Influence of the Rolling Direction of AA5056 on the Microstructure and Properties of Weld Joints obtained by Friction Stir Welding.....	124
Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Teryukalova N.V., Byeli A.V. Multiphase Cu-Ti Coatings coated by Plasma Vacuum-Arc deposition on Cu-Be Alloy C17200.....	137
Gulyashinov P.A., Mishigdorzhyn U.L., Ulakhanov N.S. Effect of Mechanical Activation of the Powder Mixture on the Structure and Properties of Boro-Aluminized Low-Carbon Steels.....	151

EDITORIAL MATERIALS

Guidelines for Writing a Scientific Paper	163
Abstract requirements	166
Rules for authors	169



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Экспериментальное исследование дефектного слоя на заготовках, выращенных DMD-методом

Дмитрий Ардашев^{a, *}, Александр Дюрягин^b, Дамир Галимов^c

Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, ardashevdm@susu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6274-1953>, s.dyuryagin@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-6060-5525>, galimovdm@susu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.019

История статьи:

Поступила: 25 августа 2020
 Рецензирование: 11 сентября 2020
 Принята к печати: 14 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Аддитивные технологии
 Генеративные заготовки
 Дефектный слой
 БрАЖ10
 Стеллит 6

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время все большую популярность набирают новые методы изготовления деталей, к которым относятся аддитивные технологии. Методы выращивания деталей путем спекания порошка лазером позволяют изготавливать детали сложной формы, которые достаточно затруднительно либо вообще невозможно получить традиционными методами – литьем, штамповкой и др. Однако заготовки, полученные посредством аддитивных технологий, в частности DMD-методом (Direct Metal Deposition), не соответствуют точностным требованиям чертежа готовой детали. Следовательно, они требуют дальнейшей обработки традиционными методами резания материалов – точением, фрезерованием или шлифованием. Для проектирования операции механической обработки деталей необходимо знать припуски на обработку и величины погрешностей, сформированных на заготовительной операции, чтобы после их удаления обработанная деталь соответствовала требованиям чертежа. **Цель работы:** экспериментальное исследование величины дефектного слоя в приповерхностных слоях генеративных заготовок из Стеллита 6 и бронзы БрАЖ10, выращенных DMD-методом, посредством микроструктурных методов. **В работе** при помощи микроскопа **выполнено исследование**, заключающееся в визуальном определении дефектного слоя, отличающегося по структуре, измерении его величины, проведении химического анализа и определении характера изменения микротвердости. **Методом исследования** является микроскопическое исследование образцов, наплавленных из материалов Стеллит 6 и БрАЖ10. По снимкам, выполненным при помощи микроскопа, удалось установить линейную величину дефектного слоя. **Результаты и обсуждение.** Обнаружены вихревые образования в зоне ванны плавления, проведен их химический анализ и установлено, что концентрация химических элементов в данной области изменяется и включает в себя элементы как материала порошка, так и материала подложки. Измерение микротвердости показало, что она уменьшается по глубине от поверхности наплавленного материала к подложке, что также позволяет оценить величину дефектного слоя. Таким образом, использование представленной в настоящей работе методики микроскопических исследований структуры, химического состава и микротвердости заготовок, выращенных DMD-методом, позволит в дальнейшем прогнозировать величину припусков на обработку при проектировании операции механической обработки генеративных заготовок.

Для цитирования: Ардашев Д.В., Дюрягин А.А., Галимов Д.М. Экспериментальное исследование дефектного слоя на заготовках, выращенных DMD-методом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17.

Введение

В настоящее время в мировом машиностроении активно иницируются наукоемкие процессы, связанные с созданием принципиально новых методов конструирования и изготовления

сложнопрофильных ответственных деталей, а также новых методов их обработки. Такие детали невозможно или достаточно сложно получить традиционными методами – обработкой резанием, литьем, штамповкой и другими методами обработки материалов.

DMD (Direct Metal Deposition) – это новая аддитивная технология, которая заключается в прямом осаждении материала из газопорошковой струи металлических частиц [1–4]. Применение этого метода позволяет реализовать гене-

*Адрес для переписки

Ардашев Дмитрий Валерьевич, д.т.н., профессор
 Южно-Уральский государственный университет,
 пр. Ленина, 76,
 454080, г. Челябинск, Россия
 Тел.: +7 (351) 272-32-94, e-mail: ardashevdm@susu.ru

ративную технологию производства деталей с уникальной пространственно-сложнопрофильной внешней и внутренней геометрией без реализации трудоемких заготовительных операций. Кроме того, открывается возможность изготовления деталей с многоматериальными покрытиями, обладающими специальными многофункциональными свойствами – жаростойкостью, коррозионной стойкостью, повышенной прочностью, износостойкостью и т. д. Также с применением DMD-метода повышается эффективность ремонтно-восстановительных работ для дорогостоящих деталей (направляющих станков, корпусов турбин, пресс-форм и т. д.).

Таким образом, основными причинами перехода от традиционных методов создания сложнопрофильных заготовок к генеративным технологиям их выращивания стали высокая трудоемкость их изготовления с сохранением эксплуатационных свойств и сложности реализации последующей технологии обработки резанием [5, 6]. Применение DMD-метода позволяет упростить и повысить производительность процесса производства заготовок деталей сложной конфигурации, снизить затраты на режущий инструмент, а также сократить основное время последующей обработки резанием за счет производства заготовок, конфигурация которых практически полностью соответствует чертежу готовой детали. Последующая обработка резанием таких заготовок будет производиться с минимально возможными припусками.

Как следствие, использование технологии лазерной наплавки имеет еще одно преимущество. Данный метод позволяет существенно сократить расход материала. Его использование в значительной степени повышает коэффициент использования материала – наплавляемого порошка, что в свою очередь повышает экономическую эффективность производства.

Получение деталей, отвечающих высоким требованиям чертежа, посредством только аддитивных технологий в настоящее время невозможно. Это связано с несовершенством технологии выращивания, отсутствием методологической базы, позволяющей DMD-методами получать детали с заданными требованиями по точности, шероховатости, допускам формы и пр. Качество поверхности изделия, полученного путем

выращивания, зависит от большого количества факторов, например, температуры в зоне ванны плавления, свойств наплавляемого материала и материала подложки, гранулометрического состава порошка, скорости его подачи через сопло, характеристик лазерного излучения и др.

Практически всегда для получения окончательного изделия с соответствующими характеристиками необходимо применять традиционные методы обработки резанием – точение, фрезерование и др.

В работе А.В. Дранкова [7] рассмотрено сравнение деталей, обработанных точением и фрезерованием, заготовки которых получены методом селективного лазерного спекания и методом проката. После проведения обработки установлено, что обе детали соответствуют точностным параметрам и имеют аналогичные механические свойства.

Suman Das и Martin Wohler [8], исследуя микроструктуру детали, полученной методом селективного лазерного спекания, установили, что материал, обработанный комбинированным методом, соответствует материалу, обработанному традиционным способом.

Известно, что проектирование операции механической обработки обычно начинается с определения глубины резания исходя из суммарного припуска. Следовательно, первоочередная задача, стоящая перед инженером-технологом при проектировании технологического процесса механической обработки заготовки, – определение величины дефектного слоя в приповерхностных слоях заготовки. Дефектный слой – это слой металла, отличающийся от основного материала заготовки по его механическим и физико-химическим свойствам. Дефектный слой является одной из составляющих припуска на обработку и должен быть удален в процессе механической обработки заготовки. Эта задача может быть решена в соответствии с методикой профессора В.М. Кована [9]. Кроме методики В.М. Кована существует опытно-статистический метод определения припуска. Однако данный способ не учитывает фактической величины шероховатости и дефектного слоя, входящих в составляющие припуска [10].

Для проектирования технологии обработки генеративных деталей в совокупности с про-

ектированием эффективных технологических процессов выращивания заготовок необходимо обладать достаточными и достоверными данными, описывающими характер поверхностного слоя заготовок, полученных таким методом. Важно располагать сведениями о величине шероховатости, глубине залегания и величине дефектного слоя.

Таким образом, **целью настоящей работы является** экспериментальное исследование величины дефектного слоя в приповерхностных слоях генеративных заготовок из Стеллита 6 и бронзы БрАЖ10, выращенных DMD-методом, посредством микроструктурных методов.

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

- 1) изготовить микрошлифы исследуемых образцов;
- 2) исследовать микроструктуру наплавленного слоя;
- 3) определить химический состав наплавленного материала и материалов, образовавшихся в зоне наплавления;
- 4) выполнить исследование микротвердости наплавленного слоя;
- 5) определить размеры составляющих дефектного слоя для исследуемых образцов.

Методика исследований

Выращенные образцы из порошков материалов БрАЖ10 и Стеллит 6 были получены DMD-методом в ресурсном центре специальной металлургии на базе Южно-Уральского государственного университета с применением комплекса лазерной наплавки FL-Clad-R-4 [11].

Химический состав исходных порошков приведен в табл. 1 и 2.

Для выращивания образцов в качестве подложки использовалась стальная пластина. Для Стеллита 6 подложка изготовлена из стали 5ХНМА, для БрАЖ10 – из стали 40Х. Толщина наплавленного слоя составила для Стеллита 6 – 0,89 мм, для бронзы – 1,02 мм. Общая толщина образцов, включая наплавленный слой, составила 7,8 и 5,1 мм соответственно.

Режимы наплавки: мощность лазера – 1600 Вт, скорость сканирования лазера – 10 мм/с, расход порошка – 27 г/мин.

Подготовка образцов включала три этапа.

1. Вырезка образца. Образец необходимой величины отрезался от заготовки, при этом необходимо, чтобы процесс отрезки сопровождался охлаждением, так как при высоких температурах образцы могут потерять первоначальные свойства.

Таблица 1

Table 1

Химический состав и размер основной фракции исходного порошка для образца из Стеллита 6

Chemical composition and the size of the initial powder main fraction for the sample Stellite 6

Образец / Sample	Химический элемент / Chemical element				Размер основной фракции, мкм / The powder main fraction size, μm
	C	Cr	Co	W	
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %				
Стеллит 6 / Stellite 6	1,1	28,0	66,9	4,0	53...150

Таблица 2

Table 2

Химический состав и размер основной фракции исходного порошка для образца из БрАЖ10

Chemical composition and the size of the initial powder main fraction for the sample CuAl10Fe4

Образец / Sample	Химический элемент / Chemical element					Размер основной фракции, мкм / The powder main fraction size, μm
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %					
БрАЖ10 / CuAl10Fe4	82,5	10,0	4,0	1,0	2,0	45...106

2. Заливка смолой. Образцы после отрезки заливались в термостойкую эпоксидную смолу. Она защищает образец от коррозии и повышает удобство при исследовании. После этого образцы проходили процедуру травления.

3. Шлифовка и полировка. Данный этап производился с целью исключения внешних дефектов в виде царапин, рисок и микротрещин, возникающих в результате травления образцов.

Шероховатость поверхности образцов измерялась при помощи профилометра «Абрис ПМ-7» в пяти местах, после чего определялась ее средняя величина.

Исследование микроструктуры и химический анализ проводились с использованием автэмиссионного растрового электронного микроскопа GSM-7001F, по снимкам с которого определялись величина дефектного слоя и его химический состав. Измерение микротвердости

образцов выполнялось с использованием микротвердомера FM-800. По полученным данным строился график зависимости величины микротвердости и расстояния от поверхности наплавленного материала.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения шероховатости поверхности образцов приведены в табл. 3.

При визуальном рассмотрении изображений 50- и 500-кратного увеличения микрошлифов образцов, полученных с помощью электронного микроскопа GSM-7001F, удалось обнаружить следующее.

1. На поверхности образца из материала БрАЖ10 заметна структура, в которой снижается концентрация железа и увеличивается концентрация меди (рис. 1).

Таблица 3

Table 3

Результаты измерения шероховатости поверхности образцов
The results of measuring the surface roughness of the samples

Образец / Sample	Номер измерения / No of measurement					Среднее значение / Average
	1	2	3	4	5	
	Шероховатость поверхности образца Ra, мкм / The surface roughness of the samples, Ra, μm					
БрАЖ10 / CuAl10Fe4	36,0	34,6	38,3	32,6	32,5	34,8
Стеллит 6 / Stellite 6	24,8	22,5	23,6	25,2	22,9	23,8

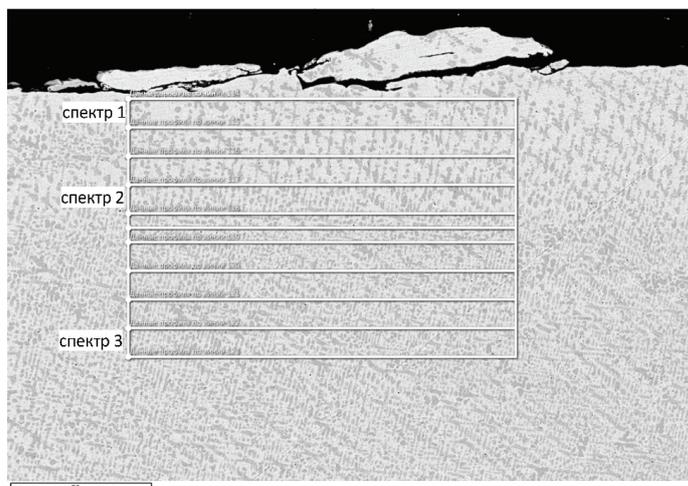


Рис. 1. Выбор спектров для проведения химического анализа образца из БрАЖ10

Fig. 1. Selection of spectra for CuAl10Fe4 chemical analysis

Это связано с отталкивающими свойствами железа по отношению к меди [12]. В связи с тем, что железо является парамагнетиком, а медь – диамагнетиком, железо выталкивает на поверхность медь.

Данное явление подтверждается результатами проведения химического анализа (см. рис. 1). Для каждого из трех спектров в табл. 4 представлен химический состав.

Измеренная величина дефектного слоя с учетом величины шероховатости на поверхности образца из БрАЖ10 изменяется в пределах 44,4...62,8 мкм (рис. 2).

2. Поверхность образца из Стеллита 6 имеет однородную структуру [13], при которой наличие дефектного слоя визуально установить не удалось. На поверхности обнаружены дефекты в виде макронеровностей, величина которых достигает 17,5 мкм (рис. 3). Величина макронеровностей перекрывается допуском на размер и не входит в составляющие для расчета припуска [9].

В области рабочей зоны, где происходит процесс плавления порошка лазерным лучом, формируются вихревые потоки [14–16].

При нагревании поверхности подложки лазером возникает явление переноса вещества

Таблица 4

Table 4

Химический состав образца из БрАЖ10
Chemical composition of a CuAl10Fe4 sample

№ спектра / Спектра No.	Химический элемент / Chemical element					
	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %					
1	7,05	0,23	0,00	28,39	64,32	0,00
2	6,15	0,22	0,02	36,74	56,77	0,10
3	5,79	0,17	0,10	42,01	51,68	0,24

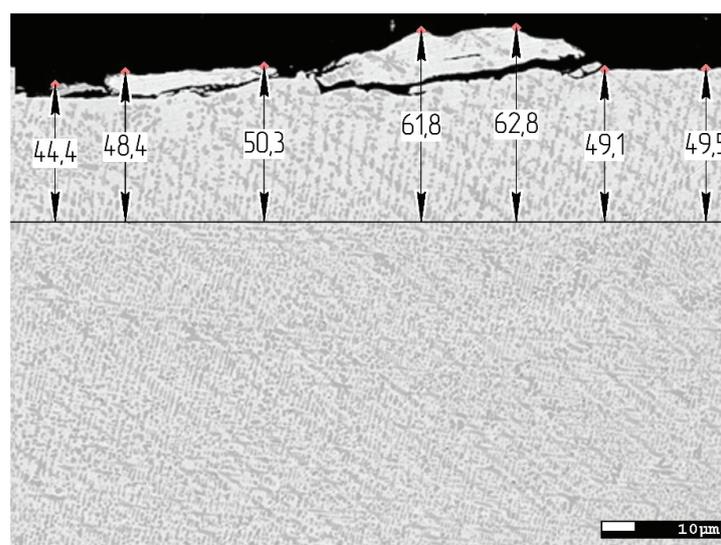


Рис. 2. Структура и величина дефектного слоя образца из БрАЖ10

Fig. 2. Structure and size of the defect layer of a CuAl10Fe4 sample

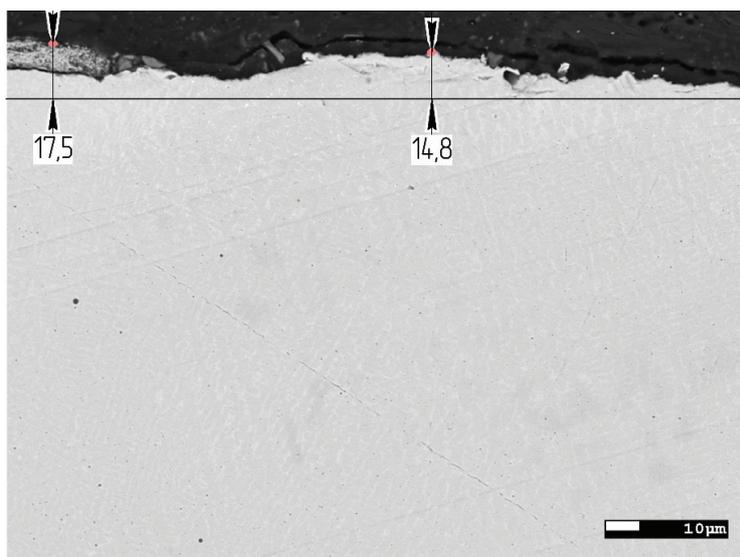


Рис. 3. Структура и величина макронеровностей образца из Стеллита 6

Fig. 3. Structure and macroroughness of a Stellite 6 sample

вдоль границы раздела двух сред, возникающее вследствие наличия градиента поверхностного натяжения и зависимости поверхностного натяжения от температуры [17]. Такое явление представляет собой разновидность конвекции и называется капиллярной конвекцией или конвекцией Марангони (эффектом Марангони или эффектом Марангони – Гиббса) [18].

Явление капиллярной конвекции становится причиной того, что при температуре наплавки выше температуры плавления материала под-

ложки возникают неустойчивости, приводящие к перемешиванию жидкости, т. е. к образованию вихрей [19]. Наличие таких вихрей визуализируется на рассматриваемых образцах.

С целью определения принадлежности областей, образованных вихревыми потоками, материалу подложки или наплавляемому материалу был проведен их химический анализ. Спектры 1 и 2 относятся к материалу подложки, 3 – к материалу вихревых потоков, 4 и 5 – к наплавленному материалу (рис. 4). Результаты приведены в табл. 5.

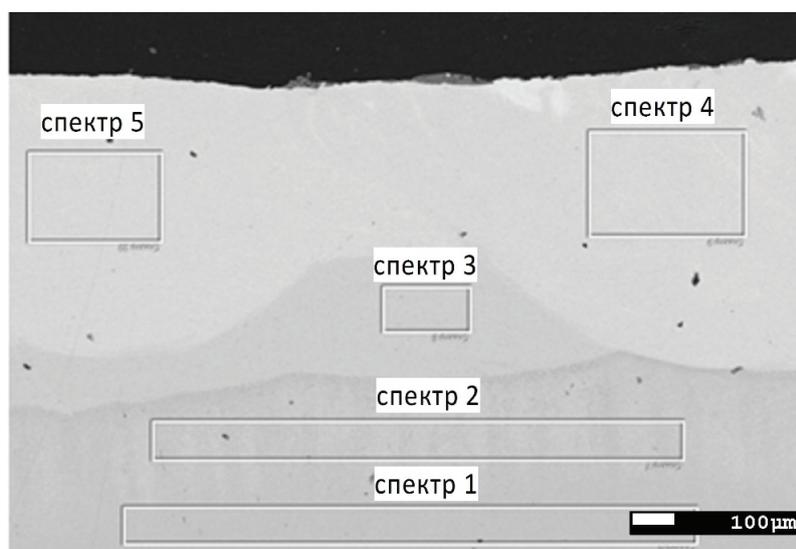


Рис. 4. Выбор спектров для проведения химического анализа

Fig. 4. Selection of spectra for Stellite 6 chemical analysis

Химический состав образца из Стеллита 6
Chemical composition of a Stellite 6 sample

№ спектра / Spectra No.	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %						
	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %						
1	0,34	0,74	96,44	0,62	1,52	0,31	0,03
2	0,42	0,71	96,27	0,58	1,60	0,18	0,25
3	0,65	13,82	74,64	0,58	8,42	1,87	0,02
4	0,60	21,42	46,92	18,94	5,56	1,42	5,14
5	0,62	22,43	42,41	22,04	5,25	1,36	5,85

Из данных табл. 5 видно, что химический состав материала в вихревых потоках отличается как от состава наплавленного материала, так и от материала подложки.

Таким образом, можно предположить, что при образовании вихревых потоков в совокупности с высокими температурами и высокой скоростью движения частиц порошка в зоне контакта с поверхностью расплавленного материала подложки попадает в вихревой поток, в результате чего образуется новый материал, в котором сокращается концентрация порошкового материала

за счет его вытеснения материалом подложки. Периодичность образования вихревых потоков материала подложки можно объяснить изменением с течением времени геометрии ванны плавления [20].

Величина слоя со стороны подложки, в котором происходят вихревые потоки, считается дефектной, так как имеет отличные от основного материала свойства. Измеренная линейная величина дефектного слоя достигает 415,8 мкм для Стеллита 6 (рис. 5) и 456,5 мкм для БрАЖ10 (рис. 6).

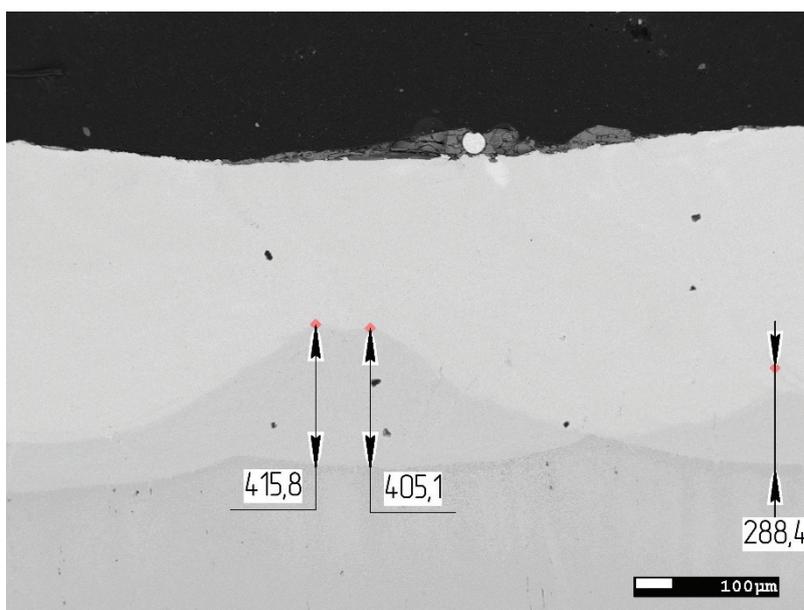


Рис. 5. Линейная величина вихревых потоков образца из Стеллита 6

Fig. 5. The linear magnitude of the vortex flows of a Stellite 6 sample

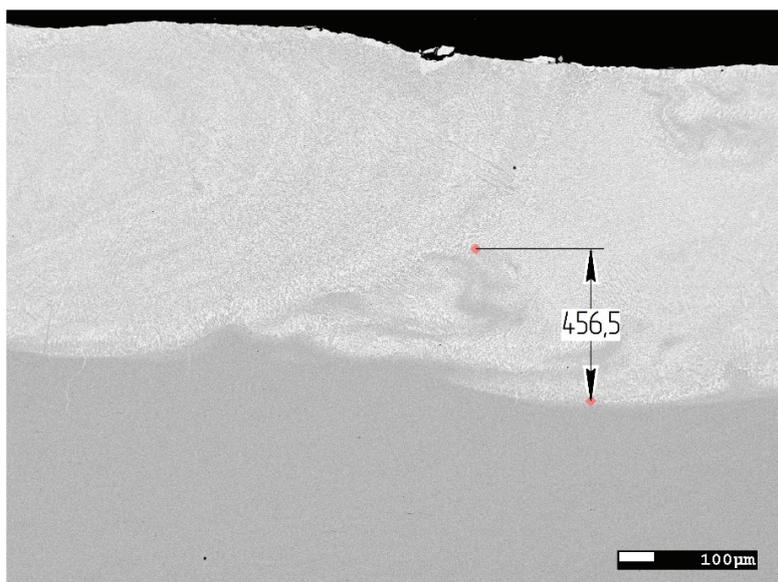


Рис. 6. Линейная величина вихревых потоков образца из БрАЖ10

Fig. 6. The linear magnitude of the vortex flows of a CuAl10Fe4 sample

В связи с тем, что на образце из бронзы не была обнаружена зона с измененной структурой материала, измерение микротвердости проводилось только для образца из Стеллита 6, так как его структура более однородная. Результаты представлены на рис. 7. Микротвердость изменяется от 426 HV у поверхности наплавленного матери-

ала до 282 HV у поверхности подложки. Таким образом, из данных видно, что в зоне вихревых образований микротвердость наплавленного материала уменьшается, что свидетельствует о наличии дефектного слоя со стороны подложки, который необходимо удалить для получения однородных свойств материала готовой детали.

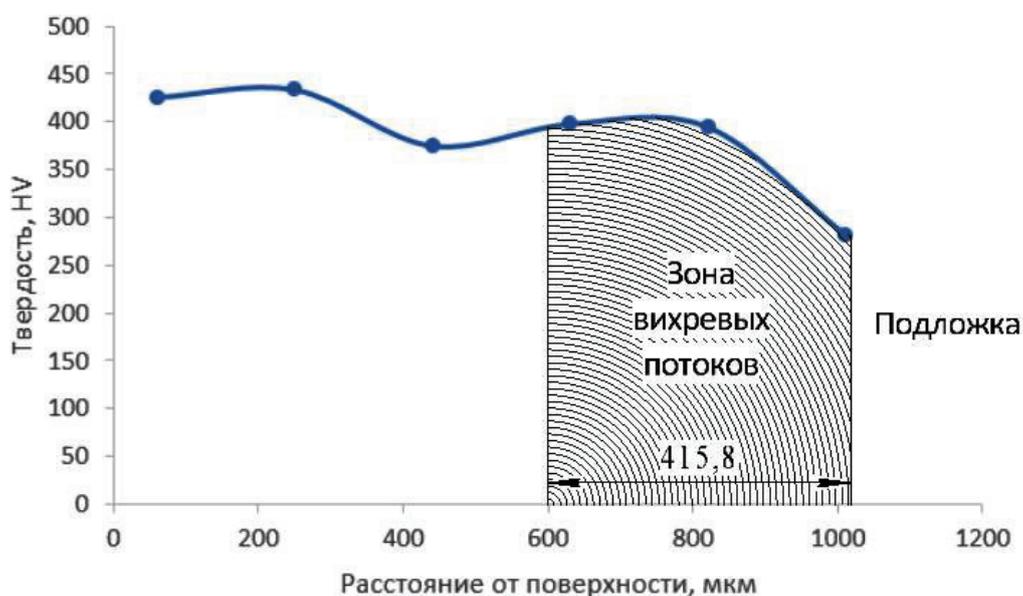


Рис. 7. Микротвердость образца из Стеллита 6

Fig. 7. Microhardness of a Stellite 6 sample

Таким образом, выполненное исследование дефектного слоя образцов из Стеллита 6 и бронзы БрАЖ10 позволило установить средние величины составляющих минимально необходимого припуска. Обобщенные данные приведены в табл. 6.

Данные табл. 6 позволяют определить минимально необходимый припуск и в дальнейшем спроектировать технологический процесс обработки резанием заготовок, выращенных DMD-методом из материалов Стеллит 6 и БрАЖ10.

Таблица 6

Table 6

Составляющие припуска образцов
Sample allowance components

Название образца / Name of sample	Составляющие припуска, мкм / Allowance components, μm		
	Ra	Дефектный слой / Defect layer	Размер вихревых потоков / Vortex flow size
БрАЖ10 / CuAl10Fe4	34,8	62,8	456,5
Стеллит 6 / Stellite 6	23,8	–	415,8

Выводы

1. В результате исследования микроструктуры наплавленного слоя на поверхности образца из материала БрАЖ10 определена линейная величина дефектного слоя, образовавшегося в результате отталкивающих свойств железа по отношению к меди. Величина дефектного слоя превышает величину шероховатости поверхности и изменяется в пределах 44,4...62,8 мкм. Для образца из Стеллита 6 такая структура отсутствует, величина дефектного слоя на поверхности образца находится в пределах шероховатости поверхности и составляет 23,8 мкм.

2. Выполненное исследование химического состава наплавленного материала позволило установить, что при выращивании заготовок со стороны подложки в рабочей зоне наплавки происходит образование вихревых потоков. В результате возникает новый материал, отличающийся по свойствам и от наплавляемого материала, и от материала подложки. Линейная величина вихревых потоков, являющихся дефектным слоем, на образце из Стеллита 6 равна 415,8 мкм, на образце из БрАЖ10 – 456,5 мкм.

3. Установлено, что при приближении к поверхности подложки микротвердость наплавленного материала снижается, что также свидетельствует о наличии вблизи подложки слоя материала, отличающегося механическими свойствами, т. е. дефектного слоя. Измеренная микро-

твердость изменяется от 426 HV у поверхности наплавленного материала до 282 HV у поверхности подложки. Протяженность зоны с измененной микротвердостью составляет 415,8 мкм.

4. В результате выполненного экспериментального исследования на заготовках, выращенных DMD-методом, определены составляющие дефектного слоя, как приповерхностного, так и со стороны подложки. Полученные результаты позволяют в дальнейшем выполнить проектирование технологии обработки резанием генеративных деталей, полученных DMD-методами. Перспективное развитие данного направления видится в разработке теоретических основ расчетного прогнозирования величины минимально необходимого припуска на обработку.

Список литературы

1. Pinkerton A.J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance // *Advances in Laser Material Processing: Technology, Research and Application*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. – P. 461–491. – DOI: 10.1533/9781845699819.6.461.

2. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD) / M.T. Dalae, L. Gloor, C. Leinenbach, K. Wegener // *Surface and Coating Technology*. – 2020. – Vol. 384. – P. 125275. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125275.

3. *Aghili S.E., Shamanian M.* Investigation of powder fed laser cladding of NiCr-chromium carbides single substrate // *Optics & Laser Technology*. – 2019. – Vol. 119. – Art. 105652. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105652.

4. *Leyens C., Beyer E.* Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition // *Laser Surface Engineering*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. – P. 181–192. – DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8.

5. *Yang Y.H., Wu F.B.* Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings // *Surface and Coating Technology*. – 2006. – Vol. 308. – P. 108–114. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.

6. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering / E. Contreras, Y. Galindez, M.A. Rodas, G. Bejarano, M.A. Gomez // *Surface and Coating Technology*. – 2017. – Vol. 332. – P. 214–222. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.

7. *Дранков А.В.* Изготовление деталей РКТ из отечественного порошка нержавеющей стали // *Аддитивные технологии*. – 2019. – № 2. – С. 50–55.

8. Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing / S. Das, M. Wohlert, J.J. Beaman, D.L. Bourell // *JOM*. – 1998. – Vol. 50. – P. 17–20. – DOI: 10.1007/s11837-998-0299-1.

9. *Кован В.М.* Расчет припусков на обработку в машиностроении: справочное пособие. – М.: Машгиз, 1953. – 210 с.

10. *Eguzwu E.O.* Key improvement in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2005. – Vol. 45. – P. 1353–1367. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.

11. Study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods / M. Samodurova, I. Logachev, N. Shaburova, O. Samoilova, L. Radionova, R. Zakirov, K. Pashkeev, V. Myasoedov, E. Trofimov // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – DOI: 10.3390/ma12193269.

12. *Бурова Д.Н., Цебрук И.С., Классен Н.В.* Исследования и применения влияния магнитного поля на систему «железо-медь-вода» // XVII Всероссийская

с международным участием школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова. – Черноголовка, 2019. – С. 134–136. – DOI: 10.24411/9999-004A-2019-10045.

13. Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited stellite 6 alloy / G.P. Rajeev, M.R. Rahul, M. Kamaraj, S.R. Bakshi // *Materialia*. – 2020. – Vol. 12. – DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100724.

14. *Туричин Г.А., Сомонов В.В., Климова О.Г.* Исследование и моделирование процесса формирования наплавочного валика и микроструктуры при лазерной наплавке излучением мощного волоконного лазера // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов V Международной научно-практической конференции*. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 410–415.

15. *Григорьянц А.Г., Мисюрлов А.И., Третьяков Р.С.* Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валиков // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 11. – С. 19–21.

16. *Moosa A.A., Kadhim M.J., Subhi A.D.* Dilution effect during laser cladding of inconel 617 with Ni-Al powders // *Modern Applied Science*. – 2011. – Vol. 5. – P. 50–55. – DOI: 10.5539/mas.v5n1p50.

17. *Веденов А.А.* Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергомашиздат, 1985. – 208 с.

18. Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process / Y. Jiang, Y. Cheng, X. Zhang, J. Yang, X. Yang, Z. Cheng // *Optik*. – 2020. – Vol. 203. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.164044.

19. *Бобученко Д.С.* Численное моделирование газопорошковой лазерной наплавки металлических материалов на подложки // *Математическое моделирование*. – 1991. – Т. 3. – С. 109–122.

20. *Шпилев А.И.* Исследование и оптимизация газопорошковых потоков в головках для лазерной порошковой наплавки: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05. – Казань, 2018. – 179 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Experimental Study of the Defect Layer on Workpieces, grown by the DMD method

Dmitrii Ardashev^{a,*}, Alexander Dyuryagin^b, Damir Galimov^c

South Ural State University, 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, ardashevdv@susu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6274-1953>, s.dyuryagin@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-6060-5525>, galimovdm@susu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 25 August 2020

Revised: 11 September 2020

Accepted: 14 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Additive technology
Generated workpieces
Defect layer
CuAl10Fe4
Stellite 6

Funding

This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

ABSTRACT

Introduction. At this time, new methods of manufacturing workpieces are gaining great popularity, for example, additive technologies. Methods for growing workpieces by sintering a powder with a laser make it possible to manufacture parts of complex shapes that are impossible or rather difficult to obtain by traditional methods, such as casting, forging, etc. However, the details, obtained by means of additive technologies, in particular the DMD method (Direct Metal Deposition), do not correspond with the accuracy requirements. Consequently, such workpieces require further processing by turning, milling or grinding. To design an operation for machining parts, it is necessary to know the machining allowances, the magnitude of errors formed during the blank operation, so that after its removal the processed part meets the requirements of the drawing. **The purpose of the work:** experimental study of the size of the defect layer in the near-surface layers of generative workpieces made of Stellite 6 and CuAl10Fe4, grown by DMD method, using microstructural methods. In the work, using a microscope, a study is carried out, which consisted in the visual determination of the defective layer, which differs in structure; measuring its size; carrying out a chemical analysis; determining the nature of the change in microhardness. **The research method** is a microscopic examination of deposited materials Stellite 6 and CuAl10Fe4 (CuAl10Fe4). From the pictures taken with a microscope, it is possible to establish the linear size of the defect layer. **Results and Discussion.** Vortex formations are found in the melting zone, its chemical analysis is carried out and it is found that the concentration of chemical elements in these areas changes and includes both elements of the powder material and the substrate material. Measurement of microhardness showed that it decreases with depth from the surface of the deposited material to the substrate. Thus, the use of the technique presented in this paper for microscopic studies of the structure, chemical composition and microhardness of workpieces, grown by the DMD method will allow to predict the value of processing allowances in the future, during the designing of mechanical processing operation of generative workpieces.

For citation: Ardashev D.V., Dyuryagin A.A., Galimov D.M. Experimental study of the defect layer on workpieces, grown by the DMD method. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17. (In Russian).

References

1. Pinkerton A.J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance. *Advances in Laser Material Processing: Technology, Research and Application*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2010, pp. 461–491. DOI: 10.1533/9781845699819.6.461.
2. Dalae M.T., Gloor L., Leinenbach C., Wegener K. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD). *Surface and Coating Technology*, 2020, vol. 384, p. 125275. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125275.
3. Aghili S.E., Shamanian M. Investigation of powder fed laser cladding of NiCr-chromium carbides singlesubstrate. *Optics & Laser Technology*, 2019, vol. 119, art. 105652. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105652.

* Corresponding author

Ardashev Dmitrii V., D.Sc. (Engineering), Professor
South Ural State University,
76 Lenin prospekt,
454080, Chelyabinsk, Russian Federation
Tel.: +7 (351) 272-32-94, e-mail: ardashevdv@susu.ru

4. Leyens C., Beyer E. Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition. *Laser Surface Engineering*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2015, pp. 181–192. DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8.
5. Yang Y.H., Wu F.B. Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings. *Surface and Coating Technology*, 2006, vol. 308, pp. 108–114. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.
6. Contreras E., Galindez Y., Rodas M.A., Bejarano G., Gomez M.A. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coating Technology*, 2017, vol. 332, pp. 214–222. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.
7. Drankov A.V. Izgotovlenie detalei RKT iz otechestvennogo poroshka nerzhavayushchei stali [Manufacturing of RCT parts from domestic stainless steel powder]. *Additivnye tehnologii = Additive technologies*, 2019, no. 2, pp. 50–55.
8. Das S., Wohler M., Beaman J.J., Bourell D.L. Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing. *JOM*, 1998, vol. 50, pp. 17–20. DOI: 10.1007/s11837-998-0299-1.
9. Kovan V.M. *Raschet pripuskov na obrabotku v mashinostroenii* [Calculation of machining allowances in mechanical engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1953. 210 p.
10. Eguzwu E.O. Key improvement in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1353–1367. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.
11. Samodurova M., Logachev I., Shaburova N., Samoilova O., Radionova L., Zakirov R., Pashkeev K., Myasodov V., Trofimov E. Study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods. *Materials*, 2019, no. 12. DOI: 10.3390/ma12193269.
12. Burova D.N., Tsebruk I.S., Klassen N.V. [Research and application of the influence of the magnetic field on the “iron-copper-water” system]. *XVII Vserossiiskaya s mezhdunarodnym uchastiem shkola-seminar po strukturnoi makrokinetike dlya molodykh uchenykh imeni akademika A.G. Merzhanova* [XVII All-Russian School-Seminar on Structural Macrokinetics for Young Scientists named after Academician A.G. Merzhanov], Chernogolovka, 2019, pp. 134–136. DOI: 10.24411/9999-004A-2019-10045. (In Russian).
13. Rajeev G.P., Rahul M.R., Kamaraj M., Bakshi S.R. Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited Stellite 6 alloy. *Materialia*, 2020, vol. 12. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100724.
14. Turichin G.A., Somonov V.V., Klimova O.G. [Investigation and modeling of the process of forming a surfacing bead and microstructure during laser surfacing by radiation of a high-power fiber laser]. *Innovatsionnye tekhnologii i ekonomika v mashinostroenii: sbornik trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [V International Scientific and Practical Conference “Innovative Technologies and Economics in Mechanical Engineering”]. Tomsk, 2014, vol. 1, pp. 410–415. (In Russian).
15. Grigor'yants A.G., Misyurov A.I., Tret'yakov R.S. Analiz vliyaniya parametrov koaksial'noi lazernoi naplavki na formirovanie valikov [Analysis of the coaxial laser surface coating condition influence on the bead formation]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Engineering technology*, 2011, no. 11, pp. 19–21.
16. Moosa A.A., Kadhim M.J., Subhi A.D. Dilution effect during laser cladding of inconel 617 with Ni-Al powders. *Modern Applied Science*, 2011, vol. 5, pp. 50–55. DOI: 10.5539/mas.v5n1p50.
17. Vedenov A.A. *Fizicheskie protsessy pri lazernoi obrabotke materialov* [Physical processes in laser processing of materials]. Moscow, Energomashizdat Publ., 1985. 208 p.
18. Jiang Y., Cheng Y., Zhang X., Yang J., Yang X., Cheng Z. Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process. *Optik*, 2020, vol. 203. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.164044.
19. Bobuchenko D.S. Chislennoe modelirovanie gazoporoshkovoi lazernoi naplavki metallicheskih materialov na podlozhki [Numerical simulation of gas-powder laser cladding of metallic materials on substrates]. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*, 1991, vol. 3, pp. 109–122. (In Russian).
20. Shpilev A.I. *Issledovanie i optimizatsiya gazoporoshkovykh potokov v golovkakh dlya lazernoi poroshkovoi naplavki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and optimization of powder flows in heads for laser powder surfacing. PhD eng. sci. diss.]. Kazan', 2019. 179 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Границы применимости метода разрывных решений в исследовании процессов волочения труб

Александр Удалов

Вятский государственный университет, ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-0210-5423>, a.v.udalov1960@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.04

История статьи:

Поступила: 11 июня 2020
 Рецензирование: 22 июня 2020
 Принята к печати: 01 октября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Труба
 Разрывное решение
 Сдвиг
 Изгибающий момент
 Напряжения
 Работа
 Волочение
 Коническая матрица

АННОТАЦИЯ

Введение. Внеконтактная деформация материала заготовки, возникающая по границам очага деформации, является одним из основных факторов, определяющих энергосиловые параметры процессов редуцирования труб. Наибольшее распространение в практике проектирования процессов обработки металлов давлением получил метод разрывных решений, позволяющий достаточно просто учесть внеконтактную деформацию при численном моделировании процессов. Однако для большинства процессов в технической литературе отсутствуют системные практические рекомендации по применению данного метода, что неизбежно приводит к несоответствию теоретических положений и практики. **Целью работы** является определение границ применимости метода разрывных решений для процессов безоправочного волочения труб через коническую матрицу, в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента, а также степени деформации и упрочнения обрабатываемого материала. **Методы исследования.** Модель очага деформации для процесса безоправочного волочения рассматривалась в двух вариантах: по методу разрывных решений и с учетом внеконтактных изгибов стенки трубы. Из условия баланса работ сил сдвига, действующих по условной поверхности среза, и изгибающих моментов, вызванных изгибом стенки трубы, при различных деформационных условиях определены граничные значения параметра толстостенности, при которых численное моделирование процессов волочения целесообразно выполнять с использованием метода разрывных решений. Расчеты выполнялись отдельно для двух участков очага деформации, соответствующих изгибу стенки трубы на входе в матрицу и на выходе из нее. **Результаты и обсуждения.** Численная реализация полученных зависимостей показала, что на входе в очаг деформации граничное значение параметра толстостенности увеличивается с ростом угла конусности матрицы и вытяжки за переход, но уменьшается с ростом напряжения противонапряжения и параметра толстостенности исходной заготовки. На выходе из очага деформации граничное значение параметра толстостенности увеличивается с ростом угла конусности матрицы и уменьшается с ростом коэффициента вытяжки за переход и параметра толстостенности исходной заготовки. Если параметр толстостенности исходной заготовки превышает граничное значение, то при численном моделировании целесообразно использовать метод разрывных решений. Если не превышает, то необходимо применять другие методы и модели. Результаты теоретического исследования могут быть использованы при проектировании процессов волочения труб.

Для цитирования: Удалов А.В. Границы применимости метода разрывных решений в исследовании процессов волочения труб // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 18–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-18-30.

Введение

Точность определения параметров напряженно-деформированного состояния при разработке процессов обжима [1–4] и волочения труб [5–9] во многом определяет соответствие

качества готовой продукции требованиям заказчика. Энергосиловые параметры процесса волочения и геометрическая точность труб в значительной степени зависят от внеконтактной деформации материала заготовки, возникающей в процессе редуцирования [10–14], так как ее доля в суммарном влиянии всех факторов может составлять более 25 % [10–12]. Несмотря на значительное количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных данному вопросу, отсутствуют системные практические

*Адрес для переписки

Удалов Александр Викторович, к.т.н., доцент
 Вятский государственный университет,
 ул. Московская, 36,
 610000, г. Киров, Россия
 Тел.: +7 (922) 930-72-455, e-mail: a.v.udalov1960@gmail.com

рекомендации, позволяющие в зависимости от деформационных условий назначать метод расчета параметров внеконтактной деформации для процессов редуцирования труб. Использование метода конечных элементов (МКЭ) для описания формоизменения материала [15–19] и распределения остаточных напряжений [20–23] в процессе волочения позволяет в значительной степени решить эту проблему. Экспериментальную проверку точности таких теоретических моделей целесообразно выполнять методом индентирования [24, 25], позволяющим с высокой точностью определять распределение напряжений в пределах очага деформации.

Однако разработка программ для проектирования процессов обработки давлением с использованием метода конечных элементов (МКЭ), обладающего высокой точностью, характеризуется и значительной трудоемкостью, а использование готового лицензионного программного продукта обходится очень дорого. Поэтому в инженерной практике по причине экономической целесообразности при определении энергосиловых параметров (напряжения и силы процесса волочения) наибольшее применение получили более простые модели, использующие, например, метод разрывных решений [1, 11–14]. При этом в результате принимаемых в инженерных методах допущений точность расчетов снижается, и результаты теоретических исследований не всегда соответствуют экспериментальным. В связи с этим в теоретических исследованиях процессов пластического обжима и волочения [11–14] установлено, что целесообразность использования метода разрывных решений определяется конкретными деформационными условиями процесса. Разработанная методика [11] может быть использована в теоретических исследованиях любых процессов обработки трубных заготовок, что позволит в конечном итоге повысить точность расчетов с использованием инженерных методов.

Целью данной статьи является определение границ применимости метода разрывных решений для процессов безправочного волочения труб через коническую матрицу в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента, а также степени деформации и упрочнения обрабатываемого материала.

Методика проведения экспериментального исследования

Исследование выполнено для процесса безправочного волочения с учетом противонапряжения. Модель очага деформации при исследовании процессов волочения труб представляется в одном из двух вариантов, показанных на рис. 1 и 2. В модели по методу разрывных решений (рис. 1) внеконтактные пластические изгибы стенки трубы на входе в конический участок матрицы и на выходе из него заменены условными поверхностями среза $I-I$ и $II-II$, в которых осевое напряжение процесса получает приращения $\Delta\sigma_{Z1}$ и $\Delta\sigma_{Z2}$ соответственно. По условным поверхностям среза в радиальном направлении действуют касательные напряжения τ_p .

Модель очага деформации, построенная с учетом внеконтактных изгибов стенки трубы на входе в конус матрицы и на выходе из него, показана на рис. 2. Участок внеконтактного изгиба на выходе из конуса матрицы условно не показан, а радиус свободного изгиба стенки трубы равен радиусу скругления кромки инструмента r . На входе в матрицу металл трубы испытывает действие осевых растягивающих напряжений противонапряжения σ_0 . На выходе из матрицы металл испытывает действие осевых растягивающих напряжений волочения σ_Z . На входе в матрицу и на выходе из нее в сечениях резкого изменения кривизны срединной поверхности стенки трубы (например, точки A и B) возникают моменты M , действующие в осевых сечениях [11].

На практике в расчетах реализуется модель формоизменения металла, при которой деформация протекает с меньшими затратами энергии. Исходя из этого, граница применимости метода разрывных решений определяется из условия баланса работ [11] сил сдвига, вызванных касательными напряжениями τ_p (рис. 1), и изгибающих моментов M , вызванных изменением кривизны срединной поверхности стенки трубы на входе в коническую матрицу и на выходе из нее (рис. 2). Данное условие баланса работ необходимо рассматривать для каждого участка внеконтактной деформации в отдельности.

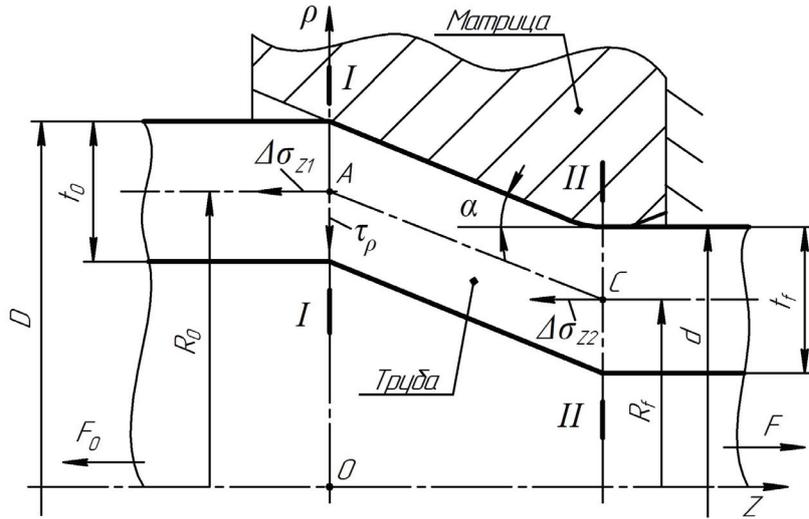


Рис. 1. Схема очага деформации процесса по методу разрывных решений:

t_0, D, R_0 – соответственно толщина стенки, наружный диаметр и радиус срединной поверхности исходной трубы; t_f, d, R_f – соответственно толщина стенки, наружный диаметр и радиус срединной поверхности трубы на выходе из конического участка матрицы; α – угол конусности матрицы; F – сила процесса волочения; F_0 – сила противонатяжения

Fig. 1. Diagram of the deformation zone of the process by the method of discontinuous solutions:

t_0, D, R_0 – the wall thickness, outer diameter and radius of the middle surface of the original pipe respectively; t_f, d, R_f – the wall thickness, outer diameter and radius of the middle surface of the pipe at the exit from the conical section of the matrix respectively; α – matrix taper angle; F – force of the drawing process; F_0 – anti-tension force

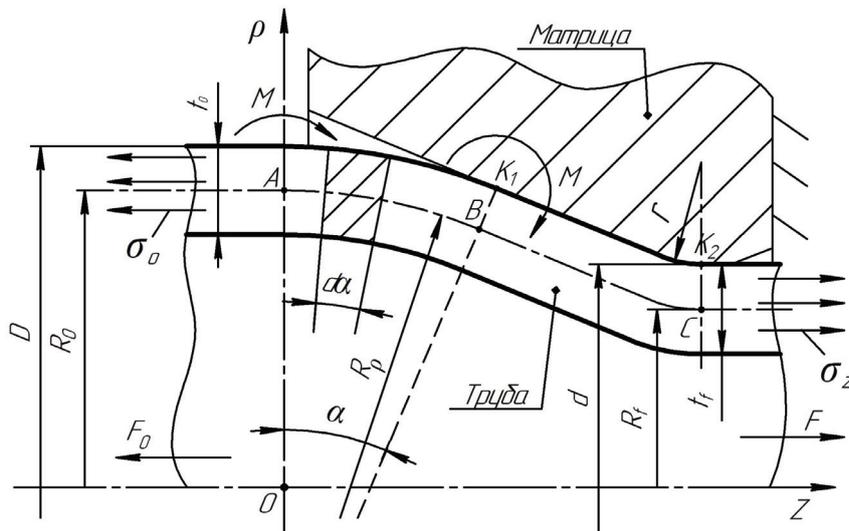


Рис. 2. Схема очага деформации с учетом внеконтактного изгиба стенки трубы:

R_p – радиус свободного изгиба стенки трубы; σ_z – полное напряжение волочения трубы; σ_0 – напряжение противонатяжения

Fig. 2. Diagram of the deformation zone taking into account non-contact bending of the pipe wall:

R_p – pipe bend radius; σ_z – full pipe drawing stress; σ_0 – anti-tension stress

В решении используется цилиндрическая система координат φ, ρ, z , в которой ось z совпадает с осью деформируемой трубы, ось ρ перпендикулярна оси трубы, φ – это угловая координата, откладываемая в плоскости, перпендикулярной оси деформируемой трубы. Условия равенства работ составляются для элемента полоски единичной ширины на пути перемещения элемента стенки трубы в пределах элементарного угла $d\alpha$ участка внеконтактной деформации (рис. 2). Данный метод решения использовался, например, в работе [11]. При волочении без оправки принимается постоянство толщины стенки трубы, т. е. $t_f = t_0$.

Определение границ применимости метода разрывных решений для внеконтактного участка стенки трубы на входе в конический участок матрицы при безоправочном волочении с противонапряжением

При волочении с противонапряжением на входе в конический участок матрицы стенка трубы совершает изгиб совместно с действием осевых растягивающих напряжений σ_0 , создаваемых силой противонапряжения F_0 (рис. 2). В соответствии с разработанной методикой [11] условие баланса работ сил сдвига и изгибающих моментов по условной поверхности среза $I-I$ на входе в матрицу запишется в виде

$$A_\tau = A_M + A_Z, \quad (1)$$

где A_τ – работа сил сдвига, вызванных касательными напряжениями τ_ρ , действующих по условной поверхности среза $I-I$ (рис. 1); A_M – работа изгибающих моментов M (рис. 2), вызванных свободным изгибом стенки трубы на входе в конический участок матрицы при отсутствии осевых напряжений; A_Z – работа момента от сил, вызванных осевыми напряжениями противонапряжения σ_0 относительно точки B внеконтактного участка (рис. 2).

Работа сил сдвига определяется по формуле [11]

$$A_\tau = \Delta\sigma_{Z1} t_0 R_\rho d\alpha. \quad (2)$$

Радиус свободного изгиба R_ρ стенки трубы на входе в конический участок матрицы равен [10, 11]

$$R_\rho = \frac{\sqrt{R_0 t_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha}. \quad (3)$$

Приращение осевого напряжения $\Delta\sigma_{Z1}$, вызванное действием сил сдвига на входе трубы в конический участок матрицы [11]:

$$\Delta\sigma_{Z1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S0} \sin^2 \alpha, \quad (4)$$

где σ_{S0} – предел текучести материала исходной заготовки.

С учетом выражений (3) и (4) формула (2) представляется в виде

$$A_\tau = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{S0} \sin^2 \alpha \cdot t_0 \frac{\sqrt{R_0 t_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha} d\alpha. \quad (5)$$

Работа изгибающих моментов M , вызванных двойным изгибом стенки трубы на входе в конус матрицы (рис. 2), равна

$$A_M = 2M d\alpha. \quad (6)$$

Здесь $M = \frac{\sigma_{S1} t_0^2}{4}$ – изгибающий момент, вызванный изменением кривизны срединной линии стенки трубы при ее свободном изгибе [10, 11], где σ_{S1} – среднее значение сопротивления деформации материала в пределах внеконтактного участка на входе в конус матрицы.

Работа момента сил от действия напряжения противонапряжения σ_0 относительно точки B внеконтактного участка определяется по формуле

$$A_Z = \frac{1}{2} \sigma_0 t_0 R_\rho \cdot (1 - \cos \alpha) d\alpha. \quad (7)$$

Сопротивление деформации σ_{S1} определяется по степенной зависимости

$$\sigma_{S1} = \sigma_{S0} + g\Lambda^b. \quad (8)$$

Здесь g и b – эмпирические коэффициенты упрочнения материала; Λ – интенсивность деформаций сдвига; интенсивность деформаций сдвига определяется по формуле

$$\Lambda = \sqrt{2/3} \times \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_Z)^2 + (\varepsilon_Z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_\rho)^2}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_\varphi = \frac{1 - \cos \alpha}{\sqrt{2} \sin \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\bar{t}_D}{1 - \bar{t}_D}}$ – степень деформации

материала внеконтактной зоны на входе в очаг деформации в окружном направлении [11]; $\varepsilon_\rho = 0$ – степень деформации металла внеконтактной зоны на входе в очаг деформации в радиальном направлении; $\varepsilon_Z = -\varepsilon_\varphi$ – степень деформации металла внеконтактной зоны на входе в очаг деформации в осевом направлении.

После подстановки (5), (6) и (7) в (1) и соответствующих преобразований определяется граничное значение параметра толстостенности труб $\bar{t}_0 = \frac{t_0}{2R_0}$ для участка внеконтактной деформации на входе в матрицу

$$\bar{t}_0 = \left(\frac{\sigma_{S0}}{\sigma_{S1}} \cdot \frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{3}} - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S1}} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \right)^2. \quad (10)$$

Если параметр толстостенности исходной трубы $\frac{t_0}{2R_0}$ превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулой (10), то в теоретическом исследовании процесса безоправочного волочения целесообразно применять метод разрывных решений и использовать модель очага деформации, представленную на рис. 1.

Определение границ применимости метода разрывных решений для внеконтактного участка стенки трубы на выходе из конического участка матрицы при волочении без оправки

На выходе из конического участка матрицы стенка трубы совершает изгиб совместно с действием осевых растягивающих напряжений σ_Z , создаваемых силой волочения F .

Условие баланса работ сил сдвига и изгибающих моментов по условной поверхности среза II-II на выходе из матрицы запишется в виде

$$A_\tau = A_M + A_Z, \quad (11)$$

где A_τ – работа сил сдвига, вызванных касательными напряжениями τ_ρ , действующих по условной поверхности среза II-II (рис. 1); A_M – работа изгибающих моментов M (рис. 2), вызванных свободным изгибом стенки трубы на

выходе из конического участка матрицы при отсутствии осевых напряжений; A_Z – работа момента от сил, вызванных осевыми напряжениями σ_Z относительно точки K_2 контакта трубы с матрицей (рис. 2).

С учетом принятых допущений и основных положений формулы (5) работа сил сдвига по условной поверхности среза в плоскости II-II будет равна

$$A_\tau = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{Sf} \cdot \sin^2 \alpha \cdot t_0 \frac{\sqrt{R_f t_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha} d\alpha. \quad (12)$$

Здесь $\sigma_{Sf} = \sigma_{S0} + g\Lambda^b$ – сопротивление деформации материала на выходе из матрицы, где $\Lambda = \sqrt{3} \cdot \varepsilon$ – интенсивность деформаций сдвига материала заготовки; $\varepsilon = \ln K_D$ – степень деформации; $K_D = D/d$ – коэффициент редуцирования трубы.

Исходным параметром при расчете сопротивления деформации металла на выходе из матрицы является вытяжка трубы за переход μ_D , которая определяется по формуле

$$\mu_D = \frac{R_0}{R_f} = \frac{D - t_0}{d - t_f} = \frac{(1 - \bar{t}_D) K_D}{1 - \bar{t}_D K_D}, \quad (13)$$

где $\bar{t}_D = t_0 / D$ – параметр толстостенности трубы по наружному диаметру.

Из формулы (13) выражается коэффициент редуцирования трубы

$$K_D = \frac{\mu_D}{1 - \bar{t}_D + \mu_D \bar{t}_D}. \quad (14)$$

Затем K_D используется в формуле (12) при определении σ_{Sf} , что позволяет в расчетах учесть параметр толстостенности \bar{t}_D и вытяжку μ_D .

Работа изгибающих моментов M , вызванных двойным изгибом стенки трубы на выходе из конического участка матрицы, равна

$$A_M = 2 \frac{\sigma_{Sf} t_0^2}{4} d\alpha. \quad (15)$$

Работа момента сил от действия напряжения волочения σ_Z (рис. 2) запишется в виде

$$A_Z = \frac{1}{2} \sigma_Z t_0 \cdot \frac{t_0}{2} d\alpha. \quad (16)$$

После подстановки (12), (15) и (16) в (11) и соответствующих преобразований определяется граничное значение параметра толстостенности труб $t_0/2R_f$ на выходе из конического участка матрицы, выраженное через размеры t_0 и R_f :

$$\frac{t_0}{2R_f} = \frac{4}{3} \sin^2 \alpha \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,5\sigma_Z / \sigma_{Sf}} \right)^2. \quad (17)$$

Используя соотношение $R_f = R_0 / \mu_D$ в (17), получаем окончательное выражение для граничного значения параметра толстостенности исходной трубы $\bar{t}_0 = t_0 / 2R_0$ с учетом вытяжки за переход μ_D

$$\bar{t}_0 = \frac{4}{3} \frac{\sin^2 \alpha}{\mu_D} \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,5\sigma_Z / \sigma_{Sf}} \right)^2. \quad (18)$$

Если параметр толстостенности исходной трубы $t_0/2R_0$ превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулой (18), то в теоретическом исследовании процесса безправочного волочения целесообразно применять метод разрывных решений и использовать модель очага деформации, представленную на рис. 1.

Между напряжением волочения σ_Z и сопротивлением деформации σ_{Sf} существует строгая функциональная зависимость, которую необходимо учитывать при численной реализации формулы (18).

Связь между параметрами σ_Z и σ_{Sf} устанавливается с помощью упрощенной формулы И.Л. Перлина [26] для определения напряжения безправочного волочения

$$\sigma_Z = \ln \mu_D \cdot [1,15\sigma_S + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_f \times \\ \times (1,15\sigma_S - \Delta\sigma_Z / 2)] + \Delta\sigma_Z, \quad (19)$$

где f – коэффициент трения между металлом заготовки и конусом матрицы (в расчетах принимается $f = 0,1$); α_f – приведенный угол конуса

матрицы; $\sigma_S = \frac{\sigma_{S0} + \sigma_{Sf}}{2}$ – среднее значение сопротивления деформации материала заготовки в пределах очага деформации.

Приведенный угол α_f определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_f = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + 2m \frac{d}{D-d} \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (20)$$

где m – отношение длины калибрующей зоны матрицы к ее диаметру (в расчетах принимается $m = 0,1$).

В формуле (19) слагаемые, учитывающие напряжения на границе упругой и пластической зон, представлены в виде приращения осевого напряжения $\Delta\sigma_Z$, определяемого выражением [11]

$$\Delta\sigma_Z = \Delta\sigma_{Z\tau} + \Delta\sigma_{ZM}, \quad (21)$$

где $\Delta\sigma_{Z\tau}$ – суммарное приращение осевого напряжения, вызванное действием сил сдвига на входе трубы в конический участок матрицы и на выходе из него; $\Delta\sigma_{ZM}$ – суммарное приращение осевого напряжения, вызванное свободным изгибом стенки трубы на входе в конический участок матрицы и на выходе из него.

Суммарное приращение осевого напряжения $\Delta\sigma_{Z\tau}$ определяется в соответствии с формулой (4)

$$\Delta\sigma_{Z\tau} = 2 \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S \cdot \sin^2 \alpha. \quad (22)$$

Суммарное приращение осевого напряжения $\Delta\sigma_{ZM}$ определяется по формуле [11]

$$\Delta\sigma_{ZM} = \sigma_S \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\bar{t}_D}{1 - \bar{t}_D}}. \quad (23)$$

Аргумент натурального логарифма в формуле (19), являющийся вытяжкой за переход μ_D при безправочном волочении, определяется по формуле (13), что позволяет учесть влияние изменения толстостенности трубы.

Результаты и обсуждение

Численная реализация зависимости (10) для стали 10 показала, что на входе в матрицу параметр \bar{t}_0 увеличивается с ростом угла конусности α (рис. 3), но уменьшается с ростом напряжения противонапряжения σ_0 (рис. 3 и 4) и параметра толстостенности \bar{t}_0 (рис. 4). Анализ

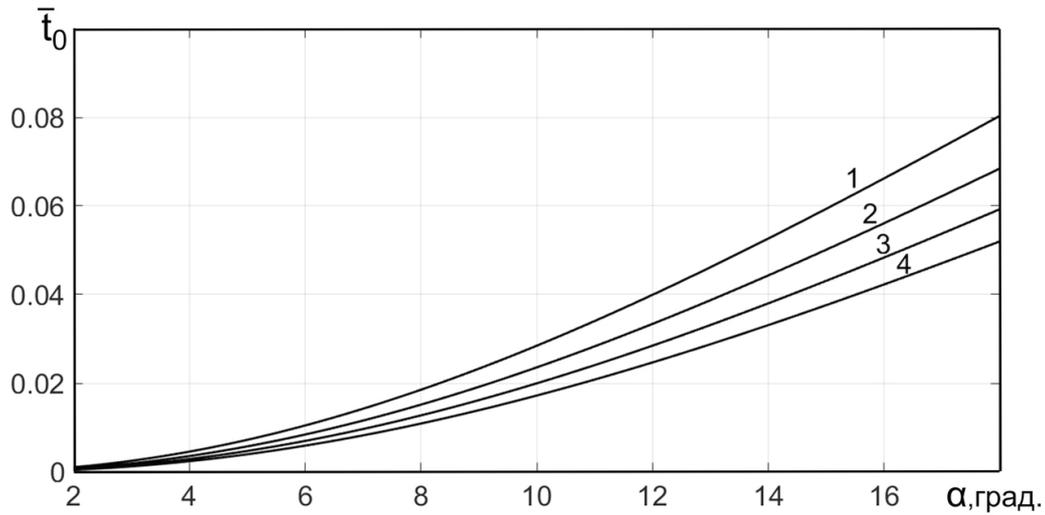


Рис. 3. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на входе в конический участок матрицы при $\bar{t}_D = 0,05$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

Fig. 3. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the entrance to the conical section of the matrix at $\bar{t}_D = 0,05$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

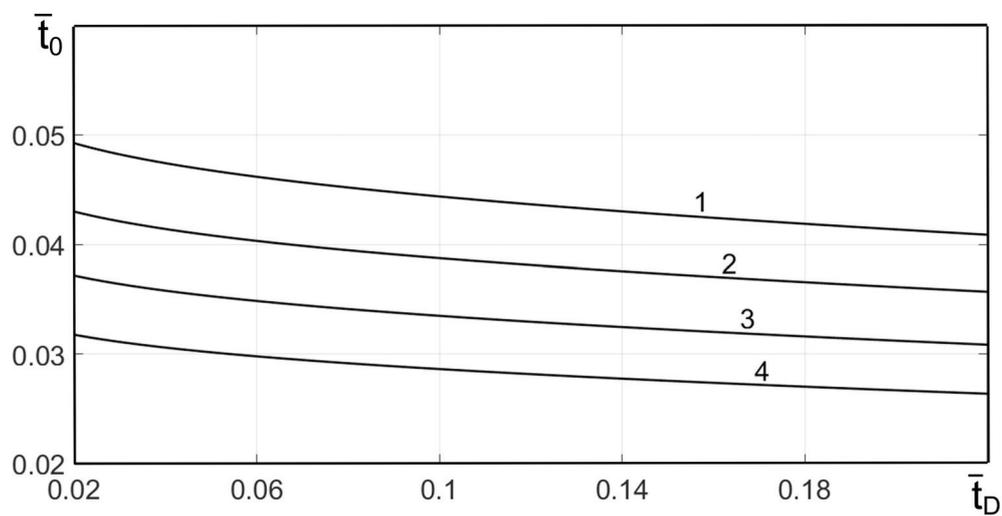


Рис. 4. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на входе в конический участок матрицы при $\alpha = 12^\circ$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

Fig. 4. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the entrance to the conical section of the matrix at $\alpha = 12^\circ$:

$$1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0; \quad 2 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,3; \quad 3 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,6; \quad 4 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{S0}} = 0,9$$

зависимости (18) показал (рис. 5 и 6), что на выходе из очага деформации параметр \bar{t}_0 увеличивается с ростом угла конусности мат-

рицы α и уменьшается с ростом коэффициента вытяжки за переход μ_D и параметра толсто-стенности \bar{t}_D .

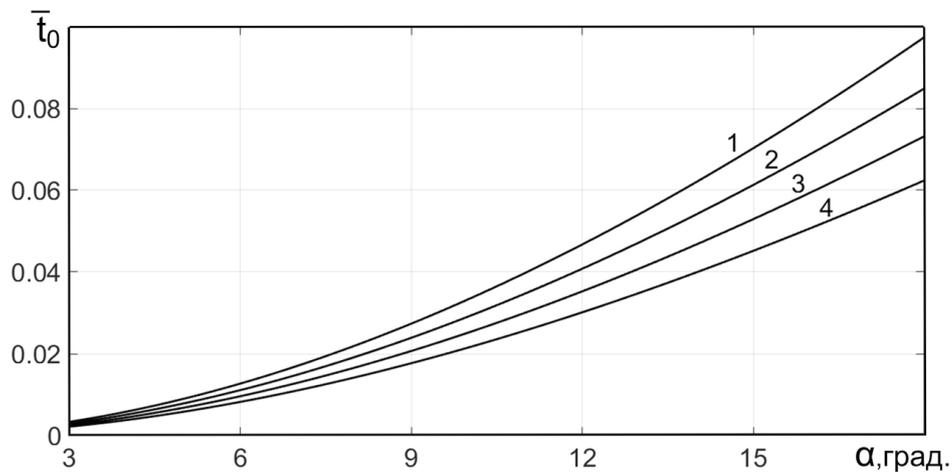


Рис. 5. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на выходе из конического участка матрицы при $\bar{t}_D = 0,05$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

Fig. 5. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the exit from the conical section of the matrix at $\bar{t}_D = 0,05$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

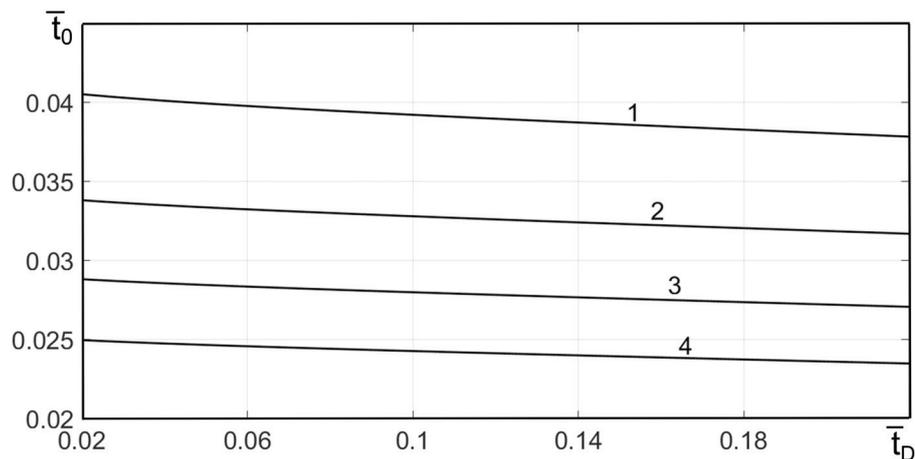


Рис. 6. Граничное значение параметра \bar{t}_0 на выходе из конического участка матрицы при $\alpha = 12^\circ$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

Fig. 6. The boundary value of the parameter \bar{t}_0 at the exit from the conical section of the matrix at $\alpha = 12^\circ$; $\sigma_0 = 0$:

$$1 - \mu_D = 1,1; \quad 2 - \mu_D = 1,2; \quad 3 - \mu_D = 1,3; \quad 4 - \mu_D = 1,4$$

Результаты исследования подтвердили ранее полученные выводы [11–14] относительно того, что более толстостенной трубе становится энергетически выгоднее совершать изгиб на входе и выходе матрицы за счет сил сдвига, нежели за счет изгибающих моментов. А с увеличением угла конусности α стенке трубы становится энергетически выгоднее совершать изгиб на входе и выходе матрицы за счет изгибающих моментов, нежели за счет сил сдвига.

Выводы

1. Полученные зависимости (10) и (18) позволяют определить условия, при которых следует использовать метод разрывных решений в теоретическом исследовании процессов безоправочного волочения труб в конической матрице.

2. Если параметр толстостенности исходной трубы $t_0/2R_0$ превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулами (10) и (18), то в теоретическом исследовании внеконтактную деформацию целесообразно учитывать с помощью метода разрывных решений.

3. Если параметр толстостенности исходной трубы $t_0/2R_0$ не превышает значение \bar{t}_0 , определяемое формулами (10) и (18), то необходимо использовать другие методы численного моделирования процессов волочения.

4. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании процессов волочения труб.

Список литературы

1. Avitzur B. Tube sinking and expanding // Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87, iss. 1. – P. 71–79. – DOI: 10.1115/1.3670762.

2. Грязев М.В., Пасынков А.А., Платонов В.И. Силовые и деформационные параметры обжима анизотропной трубной заготовки в конической матрице // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2016. – № 10. – С. 3–7.

3. An analytical solution for tube sinking by strain rate vector inner-product integration / D.W. Zhao, H.J. Du, G.J. Wang, X.H. Liu, G.D. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, iss. 1. – P. 408–415. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.011.

4. Sinking of ultra-thick-walled double-layered aluminium tubes / B. Gulseren, O. Bychkov, I. Frolov,

M. Schaper, O. Grudin // Archives of Metallurgy and Materials. – 2018. – Vol. 63, iss. 1. – P. 365–370. – DOI: 10.24425/118949.

5. Myshechkin A.A., Osadchii V.Y. Drawing of thin-walled welded pipe // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49, iss. 4. – P. 277–280. – DOI: 10.3103/S0967091219040090.

6. Осадчий В.Я., Воронцов А.Л., Карпов С.М. Расчет напряжений и усилий при волочении труб // Производство проката. – 2001. – № 10. – С. 8–12.

7. Логинов Ю.Н., Шалаева М.С., Овчинников А.С. Исследование соотношения деформаций при волочении толстостенных и тонкостенных медных труб // Производство проката. – 2011. – № 7. – С. 31–35.

8. Выдрин А.В., Яковлева К.Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке на основе совместного применения проекционного метода и метода конечных элементов // Производство проката. – 2016. – № 1. – С. 26–33.

9. Влияние модели материала на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации на примере процесса безоправочного волочения трубы / Г.В. Шимов, М.В. Ерпалов, Д.А. Павлов // Черные металлы. – 2018. – № 10. – С. 27–32.

10. Паршин С.В., Удалов А.А., Удалов А.В. Влияние внеконтактной деформации на напряжения в процессе пластического обжима труб в конической матрице // Производство проката. – 2017. – № 11. – С. 24–30.

11. Удалов А.А., Удалов А.В. Метод разрывных решений в исследовании процесса пластического обжима труб // Производство проката. – 2018. – № 2. – С. 30–36.

12. Udalov A.A., Udalov A.V., Parshin S.V. Influence of deformation conditions on the power regimes of the process of cold crimping of a pipe billet in a conical die // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946, iss. 10. – P. 812–817. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.812.

13. Баранов Г.Л. Анализ напряженно-деформированного состояния при проталкивании круглых труб // Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 4. – С. 30–35.

14. Баранов Г.Л., Кузнецов В.И. Напряжения на границе очага пластической деформации при безоправочном волочении труб // Цветные металлы. – 1988. – № 11. – С. 88–90.

15. Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis / M. Palengat, G. Chagnon, D. Favier, H. Louche, C. Linardon // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 70. – P. 69–78. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.02.003.

16. Manufacturing of precision seamless steel tubes using cold drawing technology: simulation and experiment / M. Ridzon, P. Bucek, M. Necpal, L. Parilak // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 808. – P. 80–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.808.80.

17. Kuroda K., Kawakami T., Okui T. Influential factor to dimensional precision of cold-drawn tubes // *Journal of Engineering Manufacture*. – 2014. – Vol. 229, iss. 1. – P. 100–109. – DOI: 10.1177/0954405414525381.

18. Zottis J., Soares Diehl C.A.T., Rocha A. da Silva. Evaluation of experimentally observed asymmetric distributions of hardness, strain and residual stress in cold drawn bars by FEM-simulation // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – Vol. 7, iss. 4. – P. 469–478. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.01.004.

19. Numerical simulation of cold drawing of steel tubes with straight internal rifling / P. Bella, R. Durcik, M. Ridzon, L. Parilak // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 15, iss. 10. – P. 320–326. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.225.

20. Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing / T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2001. – Vol. 28, iss. 1. – P. 65–71. – DOI: 10.1179/irs.2001.28.1.65.

21. Pirling N., Carrado A., Palkowski H. Residual stress distribution in seamless tubes determined experimentally and by FEM // *Procedia Engineering*. – 2011. –

Vol. 10, iss. 10. – P. 3080–3085. – DOI: 10.1016/j.promfg.2011.04.510.

22. Residual stresses evolution in Cu tubes, cold drawn with tilted dies – Neutron diffraction measurements and finite element simulation / F. Foadian, A. Carrado, T. Pirling, H. Palkowski // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 107, iss. 5. – P. 163–170. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.028.

23. Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes / F. Boutenel, M. Delhomme, V. Velay, R. Boman // *Comptes Rendus Mécanique*. – 2018. – Vol. 346, iss. 8. – P. 665–677. – DOI: 10.1016/j.crme.2018.06.005.

24. Удалов А.А., Удалов А.В., Паршин С.В. Определение сопротивления деформации металлов и сплавов методом внедрения индентора // *Деформация и разрушение материалов*. – 2019. – № 4. – С. 40–44. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-4-40-44.

25. Удалов А.В., Удалов А.А. Исследование изменения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали в процессе ротационной вытяжки с утонением стенки // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 59–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-59-71.

26. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



The Limits of Applicability of the Method of Discontinuous Solutions in the Study of Pipe Drawing Processes

Aleksander Udalov

Vyatka State University, 36 Moskovskaya st., Kirov, 610000, Russian Federation

 <https://orcid.org/0000-0003-0210-5423>,  a.v.udalov1960@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 June 2020

Revised: 22 June 2020

Accepted: 01 October 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Pipe

Discontinuous solutions

Shear

Bending moment

Stress

Work

Drawing

Conical die

ABSTRACT

Introduction. Non-contact deformation of the workpiece material, which occurs along the boundaries of the deformation zone, is one of the main factors determining the energy-power parameters of pipe reduction processes. The most widespread practice in the design of metal forming processes is the method of discontinuous solutions, which makes it quite simple to take into account non-contact deformation in numerical simulation of processes. However, for most processes in the technical literature there are no systematic practical recommendations on the application of this method, which inevitably leads to a mismatch of theoretical principles and practice. **The aim of the work** is to determine the limits of applicability of the method of discontinuous solutions for processes of faultless drawing of pipes through a conical die, depending on the geometric parameters of the workpiece, tool, as well as the degree of deformation and hardening of the processed material. **Research Methods**. The model of the deformation zone for the process of flawless drawing is considered in two versions: by the method of discontinuous solutions and taking into account non-contact bends of the pipe wall. From the condition of the balance of the shear forces acting on the conditional shear surface and the bending moments caused by the bending of the pipe wall, under various deformation conditions, the boundary values of the thickness parameter are determined, at which it is advisable to carry out numerical simulation of the drawing processes using the discontinuous solution method. In this case, the calculations are performed separately for two sections of the deformation zone corresponding to the bending of the pipe wall at the entrance to and exit from the die. **Results and discussions**. The numerical implementation of the obtained dependences showed that at the entrance to the deformation zone, the boundary value of the thickness parameter increases with an increase in the taper angle of the die and the hood for the transition, but decreases with an increase in the anti-tension stress and the thickness parameter of the initial workpiece. At the exit from the deformation zone, the boundary value of the thick-walled parameter increases with an increase in the taper angle of the die and decreases with an increase in the stretch coefficient for the transition and the thick-walled parameter of the initial billet. If the parameter of the thickness of the initial billet exceeds the boundary value, then in numerical modeling it is advisable to use the method of discontinuous solutions. If it does not exceed, then other methods and models should be used. The results of a theoretical study can be used in the design of pipe drawing processes.

For citation: Udalov A.V. The limits of applicability of the method of discontinuous solutions in the study of pipe drawing processes. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 18–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-18-30. (In Russian).

References

1. Avitzur B. Tube sinking and expanding. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87, iss. 1, pp. 71–79. DOI: 10.1115/1.3670762.
2. Gryazev M.V., Pasyukov A.A., Platonov V.I. Silovye i deformatsionnye parametry obzhima anizotropnoi trubnoi zagotovki v konicheskoi matritse [The power and deformation parameters of the anisotropic crimped tube stock in a conical matrix]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2016, no. 10, pp. 3–7.

* Corresponding author

Udalov Aleksander V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Vyatka State University,
36 Moskovskaya st.,
610000, Kirov, Russian Federation
Tel.: +7 (922) 930-72-45, e-mail: a.v.udalov1960@gmail.com

3. Zhao D.W., Du H.J., Wang G.J., Liu X.H., Wang G.D. An analytical solution for tube sinking by strain rate vector inner-product integration. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 1, pp. 408–415. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.011.
4. Gulseren B., Bychkov O., Frolov I., Schaper M., Grudin O. Sinking of ultra-thick-walled double-layered aluminium tubes. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2018, vol. 63, iss. 1, pp. 365–370. DOI: 10.24425/118949.
5. Myshechkin A.A., Osadchii V.Y. Drawing of thin-walled welded pipe. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49, iss. 4, pp. 277–280. DOI: 10.3103/S0967091219040090.
6. Osadchii V.Ya., Vorontsov A.L., Karpov S.M. Raschet napryazhenii i usilii pri volochenii trub [Calculation of stresses and efforts when drawing pipes]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2001, no. 10, pp. 8–12.
7. Loginov Yu.N., Shalaeva M.S., Ovchinnikov A.S. Issledovanie sootnosheniya deformatsii pri volochenii tolstostennykh i tonkostennykh mednykh trub [Strain relations during drawing the thin-walled and thick-walled copper tubes]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2011, no. 7, pp. 31–35.
8. Vydrin A.V., Yakovleva K.Yu. Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri volochenii trub na samoustanavlivayushcheisya opravke na osnove sovместного primeneniya proektsionnogo metoda i metoda konechnykh elementov [Mathematical simulation of deflected mode during tube drawing on floating plug mandrel, based on combined use of projection method and finite element method]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2016, no. 1, pp. 26–33.
9. Shimov G.V., Erpalov M.V., Pavlov D.A. Vliyanie modeli materiala na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie v ochage deformatsii na primere protsessa bezopravochnogo volocheniya truby [Effect of the material model on the stress-strain state in the deformation zone during pipe drawing]. *Chernye metally = Stahl und Eisen*, 2018, no. 10, pp. 27–32. (In Russian).
10. Parshin S.V., Udalov A.A., Udalov A.V. Vliyanie vnekontaktnoi deformatsii na napryazheniya v protsesse plasticheskogo obzhima trub v konicheskoi matritse [Influence of non-contact deformation on stresses during plastic crimping of pipes in a conical matrix]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2017, no. 11, pp. 24–30.
11. Udalov A.A., Udalov A.V. Metod razryvnykh reshenii v issledovanii protsessa plasticheskogo obzhima trub [The method of discontinuous solutions in the study of the process of plastic crimping pipes]. *Proizvodstvo prokata = Rolling*, 2018, no. 2, pp. 30–36.
12. Udalov A.A., Udalov A.V., Parshin S.V. Influence of deformation conditions on the power regimes of the process of cold crimping of a pipe billet in a conical die. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 946, iss. 10, pp. 812–817. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.812.
13. Baranov G.L. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri protalkivanii kruglykh trub [Analysis of the stress-strain state when pushing round pipes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 1984, no. 4, pp. 30–35.
14. Baranov G.L., Kuznetsov V.I. Napryazheniya na granitse ochaga plasticheskoi deformatsii pri bezopravochnom volochenii trub [Stresses at the boundary of the center of plastic deformation during faultless pipe drawing]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1988, no. 11, pp. 88–90.
15. Palengat M., Chagnon G., Favier D., Louche H., Linardon C. Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, vol. 70, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.02.003.
16. Ridzoň M., Buček P., Necpal M., Parilák L. Manufacturing of precision seamless steel tubes using cold drawing technology: simulation and experiment. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 808, pp. 80–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.808.80.
17. Kuroda K., Kawakami T., Okui T. Influential factor to dimensional precision of cold-drawn tubes. *Journal of Engineering Manufacture*, 2014, vol. 229, iss. 1, pp. 100–109. DOI: 10.1177/0954405414525381.
18. Zottis J., Soares Diehl C.A.T., Rocha A. da Silva. Evaluation of experimentally observed asymmetric distributions of hardness, strain and residual stress in cold drawn bars by FEM-simulation. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, vol. 7, iss. 4, pp. 469–478. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.01.004.
19. Bella P., Durcik R., Ridzon M., Parilak L. Numerical simulation of cold drawing of steel tubes with straight internal rifling. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 15, pp. 320–326. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.225.
20. Kuboki T., Akiyama M., Neishi Y., Kuroda K. Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing. *Ironmaking and Steelmaking*, 2001, vol. 28, iss. 1, pp. 65–71. DOI: 10.1179/irs.2001.28.1.65.
21. Pirling N., Carradò A., Palkowski H. Residual stress distribution in seamless tubes determined experimentally and by FEM. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 10, pp. 3080–3085. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.510.

22. Foadian F., Carradó A., Pirlinge T., Palkowski H. Residual stresses evolution in Cu tubes, cold drawn with tilted dies – Neutron diffraction measurements and finite element simulation. *Materials and Design*, 2016, vol. 107, iss. 5, pp. 163–170. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.028.

23. Boutenel F., Delhomme M., Velay V., Boman R. Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. *Comptes Rendus Mécanique*, 2018, vol. 346, iss. 8, pp. 665–677. DOI: 10.1016/j.crme.2018.06.005.

24. Udalov A.A., Udalov A.V., Parshin S.V. Opredelenie soprotivleniya deformatsii metallov i splavov metodom vnedreniya indentora [Determination of resistance to deformation of metals and alloys by the method of indentation]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 4, pp. 40–44. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-4-40-44. (In Russian).

25. Udalov A.V., Udalov A.A. Issledovanie izmeneniya soprotivleniya deformatsii nizeouglerodistoi stali v protsesse rotatsionnoi vytyazhki s utoneniem stenki [Investigation of changes in the resistance to deformation of low-carbon steel in the process of flow forming]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, iss. 3, pp. 59–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-59-71.

26. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of rolling large ingots]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 448 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2020 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании

Андрей Марков ^a, Вячеслав Некрасов ^b, Цзянь Су ^c, Азхар Салман ^d, Сергей Гайст ^e,
 Михаил Андреев ^{f,*}

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г. Барнаул, 656038, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>,  andmarkov@inbox.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8122-4641>,  sla44@mail.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0001-5120-3623>,  278507234@qq.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-6584-1439>,  azharmansoor76@gmail.com,
^e  <https://orcid.org/0000-0001-8697-6263>,  sergei-gaist@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-3660-3343>,  m194@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:

Поступила: 29 сентября 2020
 Рецензирование: 29 октября 2020
 Принята к печати: 15 ноября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Фрезерование
 Расслоение
 Композиционный материал
 Режимы резания

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день стеклопластик является одним из наиболее распространенных композиционных материалов, поэтому его механическая обработка продолжает быть объектом исследований. Во многих работах установлено влияние режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента на шероховатость обработанной поверхности, силы резания и износ режущего инструмента. Предметом данного исследования является качество поверхности. **Цель работы** – исследование влияния режимов обработки на расслоение и шероховатость стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании, а также проверка гипотезы о влиянии крутящего момента на расслоение. Актуальность работы обусловлена тем, что расслоение, наряду с шероховатостью, оказывает существенное влияние на качество обработки и последующей сборки готового изделия. Предлагается критерий для оценки величины расслоения композиционных материалов при их механической обработке. Приводятся результаты экспериментальных исследований крутящего момента на фрезе, относительного коэффициента расслоения и шероховатости поверхности от режимов резания. **Методы исследования.** Создана экспериментальная установка с использованием пьезоэлектрического датчика динамического крутящего момента компании China Botong Electric, который способен фиксировать крутящий момент, действующий на вращающуюся фрезу в процессе механической обработки. Проведен ряд опытов с целью установления связи крутящего момента, относительного коэффициента расслоения и шероховатости поверхности. **Результаты и обсуждения.** Сравнительный анализ полученных зависимостей показал, что крутящий момент напрямую связан с расслоением. Для уменьшения расслоения следует уменьшать глубину резания, а с целью обеспечения заданной производительности – увеличивать подачу и частоту вращения фрезы. Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на обработку новых классов композиционных материалов.

Для цитирования: Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, Ц. Су, А.М. Салман, С.В. Гайст, М.В. Андреев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 31–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40.

Введение

Стеклопластик – один из наиболее широко применяемых видов композиционных материалов [1–4]. Как правило, изделия из армированной стекловолокном смолы изготавливаются близки по форме к готовым деталям. Обработке под-

вергаются либо исполнительные поверхности, либо поверхности, по которым осуществляется сопряжение деталей. Для этого производится контурное фрезерование, фрезерование поверхностей и конструктивных элементов (пазов, окон, плоскостей и уступов), точение и шлифование, применяются раскройные операции и обработка отверстий [5–7]. Немеханические методы формообразования, такие как гидравлическая струйная или лазерная резка, вследствие технологических особенностей имеют ограниченное применение. Механическая обработка

*Адрес для переписки

Андреев Михаил Витальевич, к.т.н., доцент
 Алтайский государственный технический университет
 им. И.И. Ползунова,
 пр. Ленина, 46,
 656038, г. Барнаул, Россия
 Тел.: +7 (960) 962-73-11, e-mail: m194@mail.ru

также сопряжена с рядом трудностей. При механической обработке композиционные материалы с волокнистой однонаправленной структурой подвержены расслоению. Это обусловлено ярко выраженной анизотропией свойств, низкой адгезионной связью наполнителя со связующим и низкой прочностью самого связующего. Расслоение материала существенно влияет на качество обработки и последующей сборки готового изделия. Для предотвращения подобных дефектов технологи в соответствии с действующими нормативами и справочными материалами вынуждены назначать «мягкие» режимы резания. Однако это снижает производительность обработки и влияет на стоимость изготовления. Отсутствие единого критерия для количественной оценки величины расслоения, а также функциональной зависимости расслоения от режимов обработки требует от технологов проведения поисковых экспериментов при проектировании технологий и не дает возможности автоматизировать процесс обработки [8–14].

На сегодняшний день большая часть работ, связанных с обработкой стеклопластиков, посвящена изучению влияния режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента на силы резания, износ режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности [15–22]. Устанавливаются пути повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов [23, 24]. На основании анализа процесса стружкообразования стекловолоконных композитов нами было сделано предположение о влиянии сил резания и, как следствие, крутящего момента на расслоение. Так как при фрезеровании зубья фрезы контактируют с обрабатываемым материалом циклически, непосредственное измерение сил резания, особенно при высоких скоростях, сопряжено со значительными трудностями. При этом крутящий момент вполне может дать необходимую информацию о степени силового воздействия инструмента на обрабатываемый материал. **Целью данной работы является** исследование влияния режимов обработки на расслоение и шероховатость стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании, а также проверка гипотезы о влиянии крутящего момента на расслоение.

Задачи исследований: 1) установление зависимостей крутящего момента на фрезе, шеро-

ховатости обработанной поверхности и относительного коэффициента расслоения от режимов обработки; 2) установление зависимости относительного коэффициента расслоения от крутящего момента на фрезе.

Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований фрезерования стекловолоконных композитов на базе фрезерного станка модели ГФ2171С5 была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы размерами 500×80×5 мм из стеклотекстолита марки 3240 на основе эпоксидно-фенольной смолы. Этот материал обладает хорошими электроизоляционными свойствами, поэтому он широко применяется при изготовлении изоляционных устройств и компонентов электрических изделий. В табл. 1 приведены некоторые основные свойства стеклотекстолита.

В качестве инструмента использовалась фреза концевая четырехзубая из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 10 мм. Инструмент из быстрорежущей стали уступает по своим рабочим характеристикам инструменту из сверхтвердых материалов, однако невысокая стоимость и возможность перетачивания обеспечивают его широкое применение на производстве.

Обязательным условием при проведении экспериментальных исследований являлся контроль остроты режущих кромок инструмента с использованием микроскопа ММИ-2. На рис. 2 показан внешний вид рабочей части фрезы перед началом экспериментов (рис. 2, а) и после окончания периода приработки (рис. 2, б).

Для измерения крутящего момента использовался пьезоэлектрический датчик динамического крутящего момента компании China Botong Electric, способный фиксировать крутящий момент, воспринимаемый вращающимся валом в процессе работы. Диапазон измерения датчика 0...50 Н·м, погрешность измерения 0,5 %. Шероховатость Ra контролировалась на профилографе-профилометре модели HOMMEL TESTER W55. Ширина отслоившейся области измерялась с использованием микроскопа ММИ-2.



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки
 Fig. 1. Schematic diagram of the experimental assembly

Таблица 1
 Table 1

Свойства стеклотекстолита
Fiberglass Properties

Свойство / Property	Значение / Value	Единица измерения / Unit of measurement
Плотность	1700...1900	кг/м ³
Термостойкость	200	°C
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, в условиях T = 15...35 °C, влажность 45...75 %, не менее	340	МПа
Ударная вязкость по Шарпи параллельно слоям на образцах с разрезом, не менее	33	кДж/м ²

В результате экспериментальных исследований необходимо получить зависимости крутящего момента на фрезе M (Н·м), шероховатости поверхности Ra (мкм) и относительного коэффициента расслоения δ (%) как функции режимов резания:

$$M = a_M t^{x_M} S_o^{y_M} n^{z_M}; \tag{1}$$

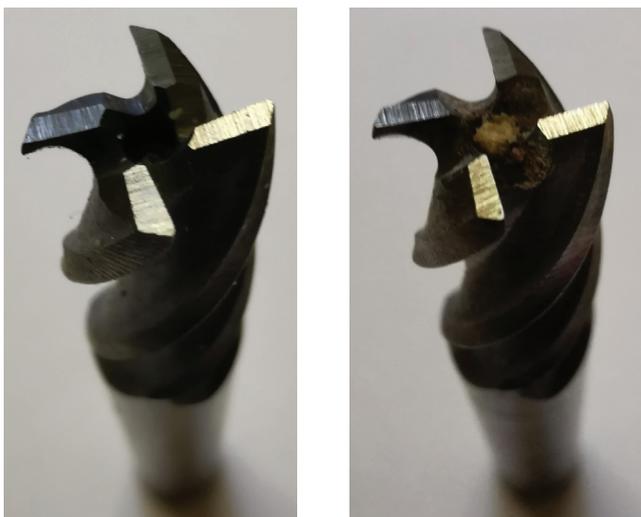
$$Ra = a_{Ra} t^{x_{Ra}} S_o^{y_{Ra}} n^{z_{Ra}}; \tag{2}$$

$$\delta = a_\delta t^{x_\delta} S_o^{y_\delta} n^{z_\delta}; \tag{3}$$

где a_M, a_{Ra}, a_δ – эмпирические коэффициенты; t – глубина резания, мм; S_o – подача на оборот, мм/об; n – частота вращения фрезы, об/мин; $x_M, x_{Ra}, x_\delta, y_M, y_{Ra}, y_\delta, z_M, z_{Ra}, z_\delta$ – показатели степени.

При проведении экспериментов обработка велась параллельно слоям стекловолокна. Режимы обработки варьировались в следующих диапазонах:

- глубина резания t от 1 до 5 мм;
- подача на оборот S_o от 0,1 до 0,25 мм/об;
- частота вращения фрезы n от 250 до 1000 об/мин.



a

б

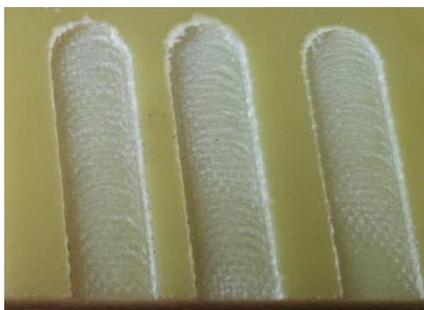
Рис. 2. Концевые фрезы:

a – до экспериментов; *б* – после приработки

Fig. 2. End mills:

a – before experiments; *б* – after break-in period

На рис. 3 показан образец с характерным дефектом в виде расслоения по границам паза и изменением цвета отслоившейся области.



a



б

Рис. 3. Пример отслоившегося образца:

$t = 1$ мм, $S_o = 0,1$ мм/об, $n = 250$ об/мин (*a*);
 $t = 3$ мм, $S_o = 0,15$ мм/об, $n = 500$ об/мин (*б*)

Fig. 3. Example of the delaminated specimen:

$t = 1$ mm, $S_o = 0,1$ mm/rev, $n = 250$ rev/min (*a*);
 $t = 3$ mm, $S_o = 0,15$ mm/rev, $n = 500$ rev/min (*б*)

На рис. 4 приведена схема для расчета критерия расслоения.

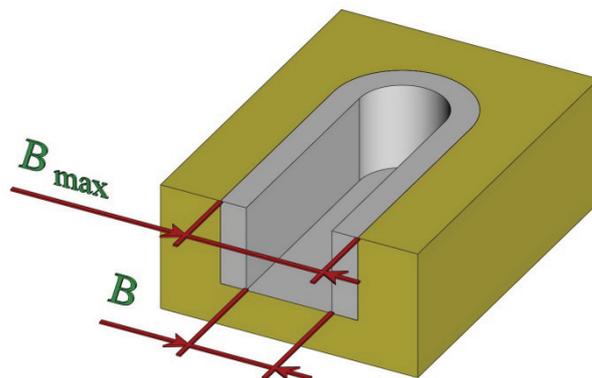


Рис. 4. Схема для расчета критерия расслоения
 Fig. 4. Diagram for calculation of the delamination criterion

Для того чтобы оценить, на сколько процентов от величины номинального размера может происходить расслоение, предложено использовать относительный коэффициент расслоения

$$\delta = \frac{B_{\max} - B}{B} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где B_{\max} – максимальная ширина отслоившейся области, расположенной по границам паза, мм; B – ширина паза, мм.

Значение δ необходимо для получения четкого представления о возможных отклонениях размера B_{\max} от номинального B и является показателем для оценки качества обработки.

Результаты и их обсуждение

Была проведена аппроксимация экспериментальных данных степенными функциональными зависимостями по программе в системе компьютерной алгебры Maple:

$$M = 67\,739t^{2,187}S_o^{1,444}n^{-1,666}; \quad (5)$$

$$Ra = 1,422t^{-0,116}S_o^{0,369}n^{0,26}; \quad (6)$$

$$\delta = 449t^{1,095}S_o^{-0,056}n^{-0,649}; \quad (7)$$

где M – величина крутящего момента на фрезе (Н · м), Ra – шероховатость поверхности (мкм), δ – относительный коэффициент расслоения (%).

Была проведена проверка принадлежности выборки экспериментальных и расчетных значе-

ний по каждому параметру одной и той же генеральной совокупности. Для этого определялось отношение (критерий Фишера) (табл. 2):

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (8)$$

где σ_1^2 и σ_2^2 – дисперсии первой и второй выборок соответственно, $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$.

Условие $F < F_\alpha$ выполняется (F_α – табличное значение критерия Фишера), это указывает на отсутствие существенного различия между дисперсиями.

Анализ степенных зависимостей позволяет судить о степени влияния режимов обработки, изменяемых в данных диапазонах, на результаты эксперимента.

Согласно формуле (2) в данных диапазонах изменения режимов резания глубина резания t оказывает на увеличение крутящего момента M гораздо большее влияние, чем подача на оборот S_0 . Частота вращения фрезы n оказывает обратное влияние, причем в средней степени. Поэтому для уменьшения крутящего момента следует уменьшать глубину резания t , а с целью обеспечения заданной производительности – увеличивать подачу на оборот S_0 и частоту вращения фрезы n .

Согласно формуле (3) в данных диапазонах изменения режимов резания подача на оборот S_0 оказывает на увеличение шероховатости Ra большее влияние, чем частота вращения фрезы n .

Таблица 2

Table 2

Расчет критерия Фишера
Calculation of the Fisher's criterion

	Крутящий момент на фрезу M , Н·м / Torque on the mill cutter M , N·m	Шероховатость поверхности Ra , мкм / Surface roughness Ra , μm	Относительный коэффициент расслоения δ , % / Relative delamination factor δ , %
Дисперсии экспериментальных значений / Dispersions of experimental values	1,452	0,59	65,6
Дисперсии расчетных значений / Dispersions of calculated values	1,446	0,60	65,3
Критерий Фишера / Fisher's criterion	1,004	1,017	1,005

Глубина резания t оказывает обратное влияние, причем в наименьшей степени.

Согласно формуле (4) в данных диапазонах изменения режимов резания глубина резания t оказывает на увеличение относительного коэффициента расслоения δ наибольшее влияние. Частота вращения фрезы n оказывает обратное влияние в средней степени, а подача на оборот S_0 оказывает наименьшее обратное влияние.

Была получена графическая зависимость (рис. 5) и степенная функциональная зависимость относительного коэффициента расслоения δ (%) от крутящего момента M :

$$\delta = 22,7 \cdot M^{0,336}. \quad (9)$$

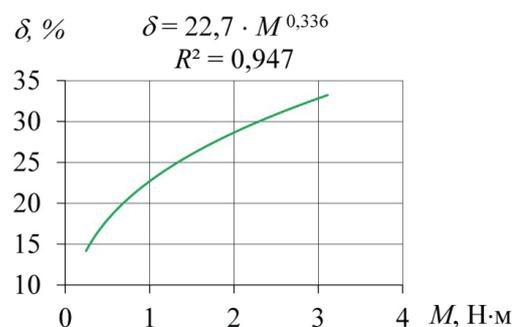


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента расслоения δ от крутящего момента M

Fig. 5. The dependence of relative delamination factor δ on torque M

Согласно формуле (9) для уменьшения степени расслоения необходимо снижать крутящий момент и в процессе обработки поддерживать его на постоянном уровне.

Выводы

1. Степенные функциональные зависимости, полученные в данной работе, показывают связь крутящего момента на фрезе (формула (5)), шероховатости поверхности (формула (6)) и относительного коэффициента расслоения (формула (7)) с режимами резания.

2. Согласно выражению (5) глубина резания оказывает наибольшее влияние на увеличение крутящего момента, подача на оборот – наименьшее, а частота вращения фрезы – обратное влияние средней интенсивности.

3. Согласно формуле (6) подача на оборот оказывает наибольшее влияние на увеличение шероховатости, частота вращения фрезы – среднее, а глубина резания – обратное влияние наименьшей интенсивности.

4. Согласно выражению (7) глубина резания оказывает наибольшее влияние на увеличение относительного коэффициента расслоения, частота вращения фрезы – обратное влияние средней интенсивности, а подача на оборот – обратное влияние наименьшей интенсивности.

5. Согласно формуле (9) крутящий момент при фрезеровании оказывает прямое влияние на расслоение стекловолоконных композитов. Для уменьшения расслоения следует, согласно выражению (7), уменьшать глубину резания, а с целью обеспечения заданной производительности – увеличивать подачу и частоту вращения фрезы.

Список литературы

1. *Matthews F.L., Rawlings R.D.* Composite materials: engineering and science. – Oxford: The Alden Press, 1999. – 480 p. – ISBN 978-1-8557-3473-9.
2. *Батаев А.А., Батаев В.А.* Композиционные материалы: строение, получение, применение. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с. – ISBN 5-7782-0315-2.
3. *Chung D.D.L.* Composite materials: functional materials for modern technologies. – London: Springer-Verlag, 2004. – 293 p. – ISBN 978-1-4471-3734-0. – DOI: 10.1007/978-1-4471-3732-0.

4. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance / M. Mehdikhani, L. Gorbatiikh, I. Verpoest, S.V. Lomov // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53, iss. 12. – P. 1579–1669. – DOI: 10.1177/0021998318772152.

5. *Arola D., Ramulu M.* Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 1997. – Vol. 39, iss. 5. – P. 597–613. – DOI: 10.1016/S0020-7403(96)00061-6.

6. *Марков А.М.* Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // *Научные технологии в машиностроении*. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.

7. Исследование влияния технологических параметров на прочность резьбового соединения в деталях из углепластика / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, А.М. Салман, С.В. Гайст, Ц. Су // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.

8. Delamination failure of a woven glass fiber composite / T. Ebeling, A. Hiltner, E. Baer, I.M. Fraser, M.L. Orton // *Journal of Composite Materials*. – 1997. – Vol. 31, iss. 13. – P. 1318–1333. – DOI: 10.1177/002199839703101304.

9. *Palanikumar K., Karunamoorthy L., Karthikeyan R.* Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites // *Materials and Design*. – 2006. – Vol. 27, iss. 10. – P. 862–871. – DOI: 10.1016/j.matdes.2005.03.011.

10. *Krishnamoorthy A., Boopathy S.R., Palanikumar K.* Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology // *Journal of Composite Materials*. – 2009. – Vol. 43, iss. 24. – P. 2885–2902. – DOI: 10.1177/0021998309345309.

11. *Kini M.V., Chincholkar A.M.* Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 7. – P. 3590–3598. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.013.

12. *Марков А.М., Счиггел Н.* Обеспечение качества изготовления деталей из композита // *Инновации в машиностроении (ИнМаш-2017): сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 28–30 сентября 2017 г.* – Новосибирск, 2017. – С. 219–225.

13. Forecasting of machined surface waviness on the basis of self-oscillations analysis / E.B. Belov, S.L. Leonov, A.M. Markov, A.A. Sitnikov, V.A. Khomenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci-*



ence. – 2017. – Vol. 50 (1). – DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012053.

14. Delamination resistance of composite laminated structures reinforced with angled, threaded, and anchored Z-pins / A. Virakthi, S.W. Kwon, S.W. Lee, M.E. Roberson // *Journal of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 53, iss. 11. – DOI: 10.1177/0021998318805201.

15. Song D.Y., Takeda N., Ogihara S. A method of stress analysis for interfacial property evaluation in thermoplastic composites // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 278, iss. 1–2. – P. 242–246. – DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00578-X.

16. Ramulu M., Kim D., Choi G. Frequency analysis and characterization in orthogonal cutting of glass fiber reinforced composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2003. – Vol. 34, iss. 10. – P. 949–962. – DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00203-3.

17. Петров М.Г. Оценка структурного состояния композиционных материалов в процессе разрушения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 4. – С. 61–67.

18. Song S., Zuo D. Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2014. – Vol. 42. – P. 98–106. – DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.011.

19. Palanikumar K., Davim J.P. Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools // *Journal of Materials Processing Technology*. –

2009. – Vol. 209, iss. 1. – P. 511–519. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.020.

20. Kalla D., Sheikh-Ahmad J., Twomey J. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50, iss. 10. – P. 882–891. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.06.005.

21. Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs / N. Feito, J. Díaz-Álvarez, A. Díaz-Álvarez, J.L. Cantero, M.H. Miguélez // *Materials*. – 2014. – Vol. 7 (6). – P. 4258–4271. – DOI: 10.3390/ma7064258.

22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Пути решения проблем формообразования режущего инструмента для обработки неметаллических композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 36–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-36-46.

23. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3. – С. 23–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

24. Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А. Повышение эффективности процесса подготовки производства изделий из композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. – № 1. – С. 20–29. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Technological Assurance of Fiberglass Composites Surface Layer Quality during End Milling

Andrei Markov^a, Vyacheslav Nekrasov^b, Jian Su^c, Azhar Salman^d, Sergei Gayst^e,
Mikhail Andreev^{f,*}

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-3101-9711>, andmarkov@inbox.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8122-4641>, sla44@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0001-5120-3623>, 278507234@qq.com, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6584-1439>, azharmansoor76@gmail.com,
^e <https://orcid.org/0000-0001-8697-6263>, sergei-gaist@mail.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-3660-3343>, m194@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 September 2020

Revised: 29 October 2020

Accepted: 15 November 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Milling

Delamination

Composite material

Cutting parameters

ABSTRACT

Introduction. Today fiberglass is one of the most common composite materials. Therefore, its mechanical processing continues to be the subject of many studies. In many scientific publications, the influence of cutting modes and structural and geometric parameters of the tool on the roughness of the machined surface, cutting forces and wear of the cutting tool has been established. The purpose of this work is to study the effect of machining modes on delamination and roughness of fiberglass composites during end milling, as well as testing the hypothesis about the effect of torque on the delamination. The relevance of the study is due to the fact that delamination, along with roughness, has a significant impact on the quality of processing and subsequent assembly of the finished product. A criterion is proposed for assessing the magnitude of the delamination of composite materials during its machining. The results of experimental studies of the torque on the cutter, the relative coefficient of delamination and surface roughness from cutting conditions are presented. **Methods:** factorial experiment using an experimental assembly developed by the authors based on a piezoelectric torque sensor. The installation allows real-time recording of the change in torque during the milling process, depending on the modes of operation. **Results and Discussion.** A comparative analysis of the obtained dependences showed that the torque is directly related to delamination. To reduce the delamination, the depth of cut should be decreased, and in order to ensure the specified productivity, the feed and the rotational speed of the cutter should be increased. The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at machining new classes of composite materials.

For citation: Markov A.M., Nekrasov V.N., Su J., Salman A.M., Gayst S.V., Andreev M.V. Technological assurance of fiberglass composites surface layer quality during end milling. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 31–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. (In Russian).

References

1. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite materials: engineering and science*. Oxford, The Alden Press, 1999. 480 p. ISBN 978-1-8557-3473-9.
2. Bataev A.A., Bataev V.A. *Kompozitsionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye* [Composite materials: structure, production, application]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 384 p. ISBN 5-7782-0315-2.
3. Chung D.D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London, Springer-Verlag, 2004. 293 p. ISBN 978-1-4471-3734-0. DOI: 10.1007/978-1-4471-3732-0.
4. Mehdikhani M., Gorbatikh L., Verpoest I., Lomov S.V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, iss. 12, pp. 1579–1669. DOI: 10.1177/0021998318772152.

* Corresponding author

Andreev Mikhail V., Ph.D. (Engineering)

I.I. Polzunov Altai State Technical University,

46 Lenina avenue,

656038, Barnaul, Russian Federation

Tel.: +7 (960) 962-73-11, e-mail: m194@mail.ru

5. Arola D., Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, vol. 39, iss. 5, pp. 597–613. DOI: 10.1016/S0020-7403(96)00061-6.
6. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features of machining of parts from composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2014, no. 7 (37), pp. 3–8.
7. Markov A.M., Nekrasov V.N., Salman A.M., Gayst S.V., Su J. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na prochnost' rez'bovogo soedineniya v detalyakh iz ugleplastika [Study of the influence of technological parameters on the strength of a threaded connection in carbon fiber parts]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, iss. 2, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.
8. Ebeling T., Hiltner A., Baer E., Fraser I.M., Orton M.L. Delamination failure of a woven glass fiber composite. *Journal of Composite Materials*, 1997, vol. 31, iss. 13, pp. 1318–1333. DOI: 10.1177/002199839703101304.
9. Palanikumar K., Karunamoorthy L., Karthikeyan R. Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites. *Materials and Design*, 2006, vol. 27, iss. 10, pp. 862–871. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.03.011.
10. Krishnamoorthy A., Boopathy S.R., Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology. *Journal of Composite Materials*, 2009, vol. 43, iss. 24, pp. 2885–2902. DOI: 10.1177/0021998309345309.
11. Kini M.V., Chincholkar A.M. Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, iss. 7, pp. 3590–3598. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.013.
12. Markov A.M., Schiggel N. [Quality assurance of parts production from composites]. *Innovatsii v mashinostroenii (InMash-2017): sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Proceedings VIII International Scientific and Practical Conference “Innovations in mechanical engineering (ISPCIME-2017)”]*. Novosibirsk, 2017, pp. 219–225. (In Russian).
13. Belov E.B., Leonov S.L., Markov A.M., Sitnikov A.A., Khomenko V.A. Forecasting of machined surface waviness on the basis of self-oscillations analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 50 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012053.
14. Virakthi A., Kwon S.W., Lee S.W., Robeson M.E. Delamination resistance of composite laminated structures reinforced with angled, threaded, and anchored Z-pins. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 53, iss. 11. DOI: 10.1177/0021998318805201.
15. Song D.Y., Takeda N., Ogihara S. A method of stress analysis for interfacial property evaluation in thermoplastic composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, vol. 278, iss. 1–2, pp. 242–246. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00578-X.
16. Ramulu M., Kim D., Choi G. Frequency analysis and characterization in orthogonal cutting of glass fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, vol. 34, iss. 10, pp. 949–962. DOI: 10.1016/S1359-835X(03)00203-3.
17. Petrov M.G. Otsenka strukturnogo sostoyaniya kompozitsionnykh materialov v protsesse razrusheniya [Evaluation of the composite materials structural condition during fracture]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4, pp. 61–67.
18. Song S., Zuo D. Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 42, pp. 98–106. DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.011.
19. Palanikumar K., Davim J.P. Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 1, pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.020.
20. Kalla D., Sheikh-Ahmad J., Twomey J. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 10, pp. 882–891. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.06.005.
21. Feito N., Díaz-Álvarez J., Díaz-Álvarez A., Cantero J.L., Miguélez M.H. Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs. *Materials*, 2014, vol. 7 (6), pp. 4258–4271. DOI: 10.3390/ma7064258.
22. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Mulyukhin N.V. Puti resheniya problem formoobrazovaniya rezhushchego instrumenta dlya obrabotki nemetallicheskih kompozitov [The lines of approach to the problems of shaping the

cutting tool for processing nonmetallic composites]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, iss. 3, pp. 36–46. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-36-46.

23. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. Sposob povysheniya effektivnosti proizvodstva izdelii iz polimernykh kompozitov [Method for improving the efficiency of products from polymer composites]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2016, no. 3, pp. 23–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

24. Lobanov D.V., Rychkov D.A., Sidorenko S.A. Povyshenie effektivnosti protsessa podgotovki proizvodstva izdelii iz kompozitov [Efficiency upgrading of composite material product production preparation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017, no. 1, pp. 20–29. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Технологическое исследование влияния параметров механической обработки на срок службы инструмента

Маноджжумар Шеладия^{1, 2, a, *}, Шейли Ачарья^{3, b}, Ганшьям Ачарья^{4, c}

¹ Гуджаратский технологический университет, г. Ахмадабад, 38242, Индия

² Университет «Атмия», Инженерно-технологический факультет, г. Раджкот, 360005, Индия

³ Технологический институт им. Сардара Валлабхай Пателя, филиал Гуджаратского технологического университета, г. Васад, 388306, Индия

⁴ Институт технологии и науки «Атмия», г. Раджкот, 360005, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9154-3355>,  mvsheladiya@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6428-8961>,  shailee.acharya@gmail.com,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-3580-3116>,  gdacharya@rediffmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91:621.9.01:621.941.01

История статьи:

Поступила: 11 сентября 2020
 Рецензирование: 06 октября 2020
 Принята к печати: 15 ноября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Стойкость инструмента
 Износ режущего инструмента по задней поверхности
 Шероховатость поверхности
 Температура режущей пластины

Благодарности:

Авторский коллектив очень признателен Университету «Атмия» в г. Раджкоте за предоставление станка с ЧПУ и другими устройствами, а также Инженерному колледжу VVP за предоставление оборудования для оптического микроскопа.

АННОТАЦИЯ

Введение. Обрабатываемость является типичным критерием, который необходимо исследовать, и многие авторы предлагают различные параметры, описывающие ее количественную оценку. Технологические параметры, такие как скорость, подача, глубина резания, комбинация инструмента и детали, типы станков и их состояние, смазочно-охлаждающая жидкость, опыт механиков и т. д. напрямую влияют на стойкость инструмента. Рациональный выбор инструмента существенно влияет на экономическую целесообразность обработки с точки зрения энергопотребления и затрат на инструмент. **Метод исследования.** В основном исследовалась стойкость инструмента на образцах из мягкой стали ISRO 50, BIS 1732: 1989 и при обработке с постоянной скоростью резания $V = 200$ м/мин. В промышленности мягкая сталь обычно используется для производства различных деталей. С учетом высокой производительности и чистоты поверхности обработка со скоростью 200 м/мин обычно является предпочтительной для достижения хорошего качества поверхности и экономичности процесса резания. Для токарной обработки использовался станок с числовым программным управлением (ЧПУ DX-150). В качестве режущего инструмента были выбраны сменные твердосплавные пластины TNMG 120408. Четыре угла пластины применялись для разного времени обработки: 10, 15, 20 и 25 мин соответственно. Износ инструмента по задней поверхности измеряли с помощью калиброванного оптического микроскопа. Температура инструмента во время обработки постоянно контролировалась на предмет ее возможного влияния на свойства сцепления вставки инструмента и красностойкость. **Результаты и обсуждение.** На основе установленной функциональной зависимости износа по задней поверхности от времени обработки становится возможным однозначное определение значения стойкости инструмента. В ходе проведенных исследований установлена взаимосвязь между стойкостью инструмента, временем обработки, количеством снятого металла, шероховатостью поверхности и температурой реза. В результате выполненных исследований разработан метод измерения износа инструмента и количественной оценки его обрабатываемости. Экспериментально подтверждено, что при постоянных параметрах процесса резания износ инструмента, температура и шероховатость поверхности зависят не только от времени обработки, но и от количества удаленного материала.

Для цитирования: Шеладия М.В., Ачарья Ш.Г., Ачарья Г.Д. Технологическое исследование влияния параметров механической обработки на срок службы инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 41–53. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-41-53.

*Адрес для переписки

Шеладия Маноджжумар В.
 Университет «Атмия»
 Инженерно-технологический факультет,
 360005, г. Раджкот, Индия,
 Тел.: +91-9898278267, e-mail: mvsheladiya@gmail.com

Введение

Давление и температура на поверхности инструмента, контактирующей со стружкой, очень велики, и работа приводит к износу режущей кромки инструмента. Окончание срока службы инструмента происходит из-за масштабного преждевременного износа или постепенного износа в зависимости от условий резания [1–3]. Ожи-

даемый износ – это постепенный прогрессирующий износ режущей кромки при нормальных условиях. Он наступает, когда обработка становится шумной и менее эффективной, а создаваемая поверхность – шероховатой [4, 5]. Наряду с ожидаемым износом есть и другие показатели, такие как снижение прочности режущей кромки, увеличение усилия инструмента и потребляемой мощности, повышение температуры резания, потеря точности размеров деталей и, в конечном итоге, потеря производительности. Таким образом, для обеспечения лучшей обработки необходимо контролировать и минимизировать износ инструмента [6, 7].

Износ инструмента – сложное явление, происходящее в результате нескольких процессов или механизмов, которые включают абразивный износ, диффузионный, коррозионный, эрозионный износ и разрушение [8, 9]. Износ по задней поверхности и кратерный износ являются наиболее важными измеряемыми формами износа инструмента. Износ по задней поверхности происходит на боковых сторонах инструмента, где он контактирует с обработанной поверхностью, как результат адгезионного и абразивного износа [10]. При износе по задней поверхности наблюдается прирост сил резания. Это в значительной степени влияет на механику резки. Область износа по задней поверхности является площадкой износа и измеряется шириной поверхности износа [11–13]. Кратерный износ в основном происходит из-за абразивного истирания и диффузии. Обычно износ задней поверхности инструмента вызывается трением между задней поверхностью инструмента и обрабатываемыми поверхностями. Его механизм очень сложен [14]. Адгезионный износ возникает, когда твердые включения рабочего материала или ускользнувшие частицы инструмента царапают заднюю поверхность и обрабатываемую деталь, а также перемещаются по площади контакта [15, 16].

Некоторые исследователи используют уменьшение веса

инструмента как меру его износа, но у этого метода есть ограничения, так как в процессе механической обработки резец испытывает адгезию и истирание. Адгезия приводит к прилипанию металлических частиц обрабатываемой детали, вес инструмента увеличивается, а фактический износ будет трудно установить. Кроме того, существует множество программных методов прогнозирования, но можно использовать и предложенный метод, поскольку он охватывает все аспекты, связанные с фактическими условиями обработки. Текущие исследования в основном сосредоточены на измерении износа по задней поверхности. Как правило, он наблюдается там, где образуется сплошная стружка (обычно в пластичном материале). В соответствии со стандартом ISO 3685:1993 для измерения износа основная режущая кромка разделена на четыре области, как показано на рис. 1. Износ инструмента обычно измеряется с помощью инструментального микроскопа (с системой видеосъемки и разрешением менее 0,01 мм) или измерительного прибора со щупом, аналогичного профилометру (со шлифованными алмазными иглами) [17].

Как правило, выход из строя и износ режущих инструментов зависит от материала и геометрии инструмента, материала заготовки, параметров резания (скорости резания, скорости подачи и

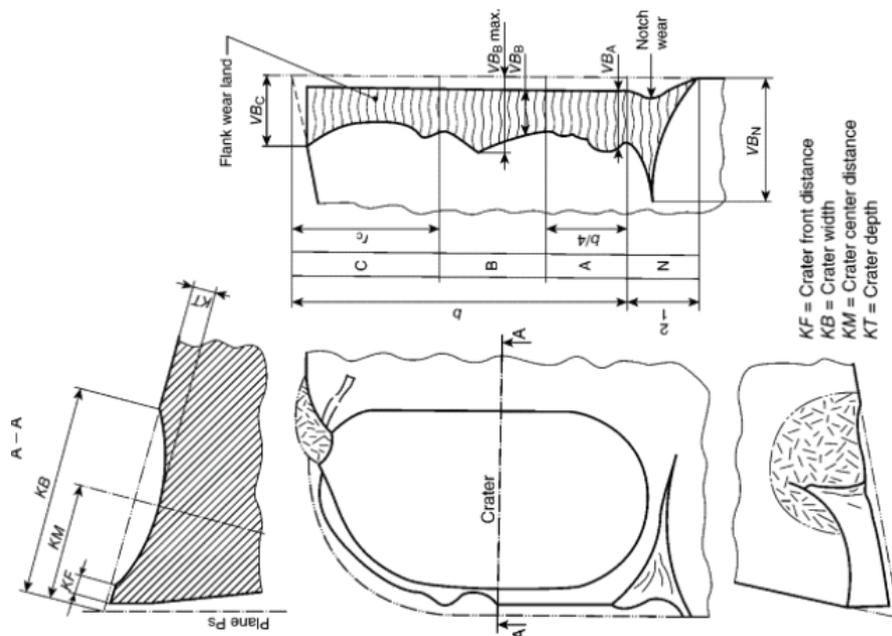


Рис. 1. Типы износа инструмента согласно стандарту ISO 3685:1993

Fig. 1. Types of tool wear according to norm ISO 3685:1993

глубины резания), смазочно-охлаждающих жидкостей и характеристик станка. На рис. 2 показана типичная кривая течения износа по задней поверхности VB_B в зависимости от времени резания для различных скоростей резания [18].

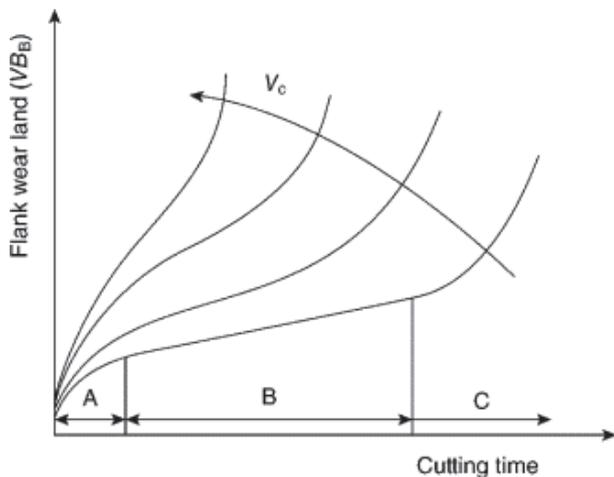


Рис. 2. Эволюция площадки износа по задней поверхности VB_B в зависимости от времени резания для различных скоростей резания

Fig. 2. Evolution of flank wear land VB_B as a function of cutting time for different cutting speeds

Критерии, рекомендованные ISO 3685:1993 для определения безотказного срока службы твердосплавного инструмента, даны ниже: $VB_{Bmax} = 0,6$ мм, если износ по задней поверхности неравномерен в области B.

Общие рекомендации, используемые в производственной практике для определения предела износа по задней поверхности VB_B для некоторых режущих материалов, приведены в табл. 1.

Целью данной работы является установление взаимосвязи между стойкостью инструмента, временем обработки, количеством снятого металла, шероховатостью поверхности и температурой резца, а также разработка метода измерения износа инструмента и количественной оценки его обрабатываемости.

Методы исследования

Экспериментальная часть включала токарную обработку образцов из мягкой стали на станке DX-150 с числовым программным управлением (ЧПУ). Конечные диаметры вычислялись с помощью аналитического расчета в MS Excel для общего времени последовательного удаления слоев в виде стружки. В табл. 2 представлены начальный и конечный диаметры в качестве выходной функции времени обработки. Для получения различного количества металла, удаляемого в процессе обработки, намеренно заданы различные начальные условия, т. е. значения диаметра и длины для всех экспериментов.

Скорость, подача и глубина резания обрабатываемой детали выбирались в соответствии с рекомендациями для заданной комбинации инструмента и заготовки [19]. Входные и выходные переменные приведены на рис. 3. На основе начального и конечного диаметров заготовки была подготовлена программа с предварительными и вспомогательными командами, т. е. G-код и M-код, как указано в Приложении 1.

После обработки угол I инструмента TNMG120408 изнашивался в течение 10 мин,

Таблица 1

Table 1

Рекомендации, используемые в производственной практике для определения предела износа по задней поверхности VB_B (мм) для некоторых режущих материалов

Recommendations used in industrial practice for a limit of flank wear VB_B (mm) for several cutting tool materials

Тип обработки / Operation	Быстрорежущие стали / HSS	Спеченные карбиды / Cemented carbides	Твердосплавный инструмент с износостойким покрытием / Coated carbides	Керамики / Ceramics	
				Al_2O_3	Si_3N_4
Черновая / Roughing	0,35...1,0	0,3...0,5	0,3...0,5	0,25...0,3	0,25...0,5
Чистовая / Finishing	0,2...0,3	0,1...0,25	0,1...0,25	0,1...0,2	0,1...0,2

Время обработки как функция начального и конечного диаметров
 Machining time as a function of initial and final diameters

№ п/п. / Sr. No.	Начальный диаметр, мм / Initial Diameter, mm	Конечный диаметр, мм / Final Diameter, mm	Длина, мм / Length, mm	Время, мин / Time, Min.
1	46,0	20,0	235,0	25,15
2	50,0	33,5	235,0	20,22
3	33,5	19,5	215,0	9,929
4	50,0	32,0	165,0	15,20



Рис. 3. Переменные ввода-вывода

Fig. 3. I / O variables

угол 2 – в течение 15 мин, угол 3 – в течение 20 мин и угол 4 – в течение 25 мин.

Схема обработки на станке с ЧПУ показана на рис. 4, где представлена закрепленная заготовка в патроне (рис. 4, а). Сначала обрабатывались кулачки патрона для надежного захвата, а также использовался центр задней бабки, чтобы про-

вести механическую обработку без вибрации. Температура угла твердосплавной пластины инструмента непрерывно измерялась с интервалом в одну минуту [20].

Износ по задней поверхности VB_{\max} пластины измерялся с помощью откалиброванного оптического микроскопа серии RMM3 (произ-

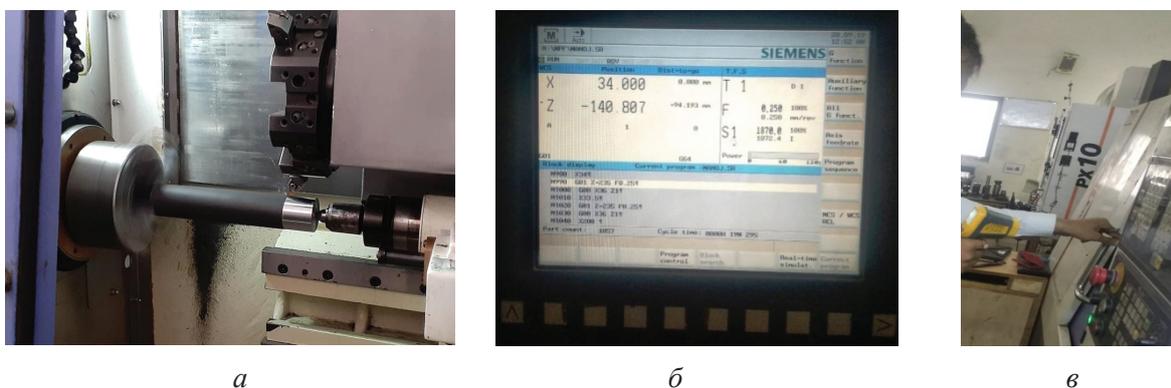


Рис. 4. Настройка обработки детали и измерение температуры пластины инструмента:
 а – точение зажатой в патроне заготовки; б – программа ЧПУ; в – измерение температуры инструмента с помощью инфракрасного датчика

Fig. 4. Machining set-up of the workpiece and temperature of the tool bit insert measurement:
 а – workpiece holding on a chuck and turning; б – CNC Program; в – temperature measurement of tool bit by infrared gun

водства Radical scientific Equipments), интегрированного с компьютерным интерфейсом, как показано на рис. 5. Прибор имеет возможность построить линию на увеличенном изображении угла пластины инструмента, и длину этой линии можно измерить. Таким образом, износ по задней поверхности VB_{\max} измерялся для каждого из четырех углов.

На рис. 6 показано измерение шероховатости поверхности обработанного образца с помощью прибора для измерения шероховатости. Сначала калибруется прибор, и он может дать среднее значение шероховатости в микрометрах. Для измерения используются различные комбинации датчиков скольжения и V-образного блока [21, 22].

Результаты и обсуждение

Ниже приведены наблюдения, основанные на обработке и последующем количественном определении выходных параметров.

Скорость износа инструмента по задней поверхности (VB_{\max})

Износ по задней поверхности (VB_{\max}) сначала определялся на увеличенном виде пластины с помощью цифрового микроскопа (рис. 7), с последующим измерением посредством соответствующего компьютерного интерфейса.

Согласно ISO 3685:1993 износ инструмента соответствует времени износа инструмента по задней поверхности 600 мкм, при линейной



Рис. 5 Цифровой микроскоп для измерения износа по задней поверхности пластины инструмента (10x):

a – настройка пластины на цифровом микроскопе; *б* – размещение вставки для измерения VB_{\max}

Fig. 5 Digital microscope for measurement of flank wear on tool insert (10x):

a – set-up of the insert on digital microscope; *б* – insert positioning for the measurement of VB_{\max}



Рис. 6. Измерение шероховатости поверхности

Fig. 6. Surface roughness measurement

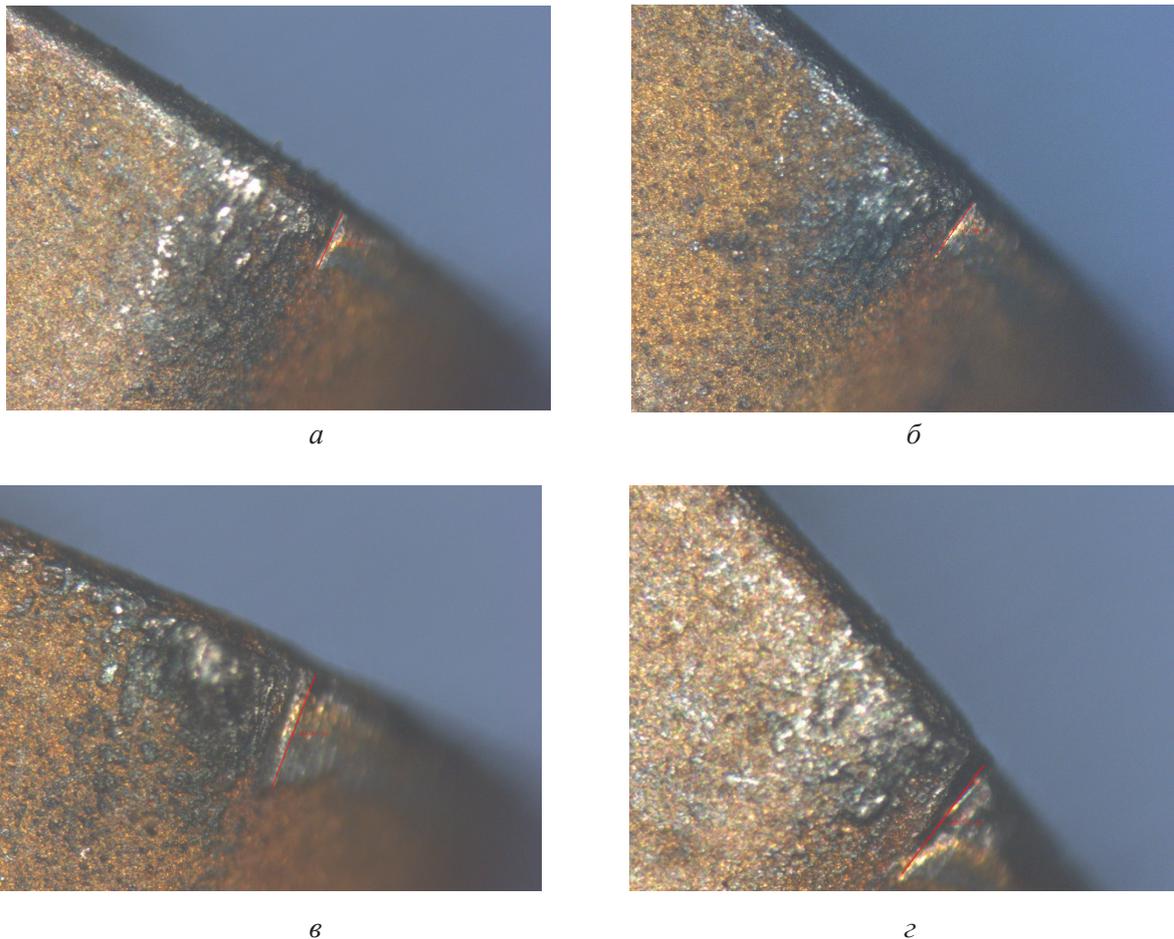


Рис. 7. Износ пластины инструмента по задней поверхности при разном времени обработки: *а* – износ по задней поверхности VB_{\max} через 10 мин точения; *б* – износ по задней поверхности VB_{\max} через 15 мин точения; *в* – износ по задней поверхности VB_{\max} через 20 мин точения; *г* – износ по задней поверхности VB_{\max} через 25 мин точения

Fig. 7. Flank wear of the tool insert at different machining time:

а – flank wear VB_{\max} after 10 Min. machining; *б* – flank wear VB_{\max} after 15 Min. machining; *в* – flank wear VB_{\max} after 20 Min. machining; *г* – flank wear VB_{\max} after 25 Min. machining

интерполяции срок службы инструмента составляет 68 мин для комбинации заготовки из низкоуглеродистой стали и пластины TNMG 1604208. Такой же график показан на рис. 8. Линейная интерполяция сопоставима с диаграммой рассеяния со значением $R^2 = 0,9837$, указывающим на то, что предположение о ее линейности является верным. Это значение указывает на то, что уровень достоверности предположения составляет 98,37.

Шероховатость поверхности обработанной детали

Шероховатость поверхности обработанного образца измерялась в поперечном направлении четырьмя метками под углом 90° по его перифе-

рии с помощью измерителя шероховатости поверхности Mitutoyo SJ-201. Их значения приведены в табл. 3.

Температура резца во время обработки

Дополнительно с помощью цифрового инфракрасного термометра НТС МТ 6 измерялась температура в углу пластины во время обработки. Графики зависимости температуры от времени показаны на рис. 9. Для всех экспериментов значение температуры вставки инструмента в любой момент не превышало 80°C , поэтому можно сказать, что точка красностойкости не достигается, но при повышенной температуре (выше комнатной)

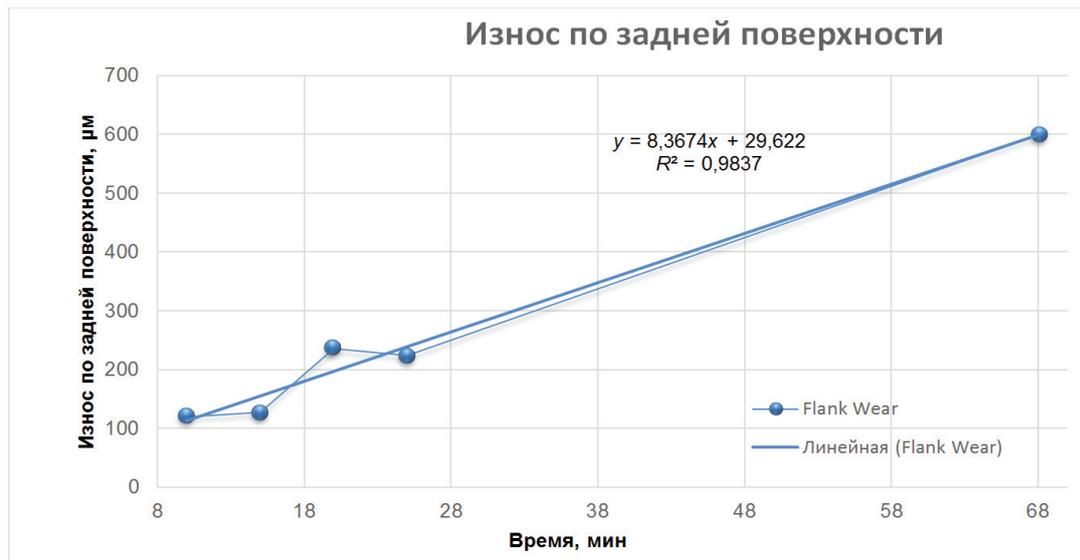


Рис. 8. График зависимости износа по задней поверхности от времени обработки

Fig. 8 Plot of flank wear vs. machining time

Таблица 3

Table 3

Измерение шероховатости обработанной детали
Roughness measurement of the machined workpiece

Средняя шероховатость, значение Ra, мкм / Roughness Average, Ra Value, μm				
Шероховатость поверхности / Surface Roughness	25 мин / 25 Min.	20 мин / 20 Min.	15 мин / 15 Min.	10 мин / 10 Min.
1	4,08	3,15	2,95	3,04
2	4,00	3,07	2,84	2,95
3	4,07	3,06	2,87	3,08
4	4,07	3,12	2,97	3,08
Среднее / Average	4,055	3,1	2,9075	3,0375

происходит размягчение любого металла, что приводит к более сильному износу, чем обозначенное значение.

Результаты научно-исследовательской работы приведены в табл. 4.

Анализ таблицы показывает, что износ боковин и среднее значение шероховатости поверхности, а также температура являются функцией массы, удаляемой механической обработкой при постоянных условиях резания, то есть скорости, подаче и глубине резания.

Заклучение

На основе проведенных экспериментальных исследований разработан метод измерения износа инструмента и предложена количественная оценка его обрабатываемости. Ранее предполагалось, что если параметры резания постоянны, то износ инструмента, температура и шероховатость поверхности зависят только от времени обработки. Однако в ходе проведенных исследований было установлено, что указанные параметры являются функцией количества удаляемого

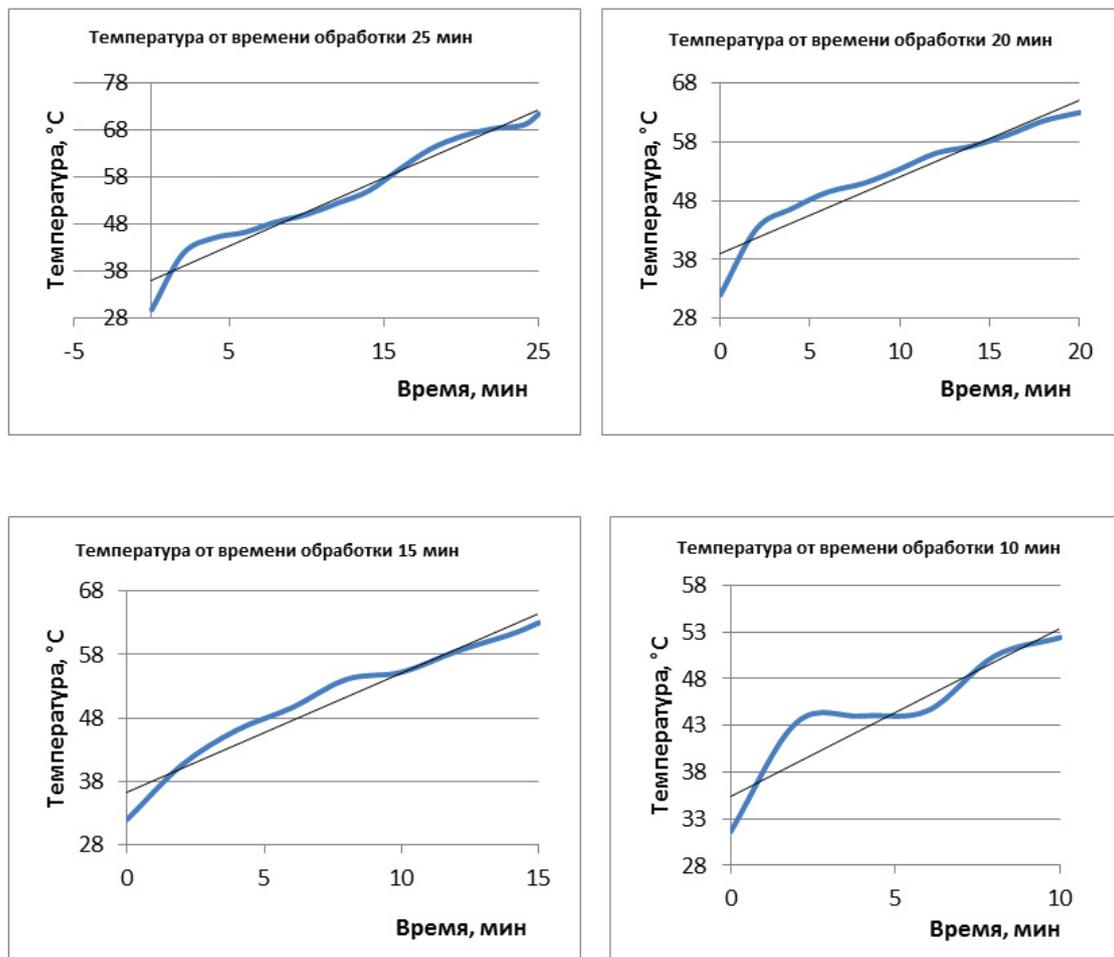


Рис. 9. График зависимости температуры в углу пластины от времени обработки
 Fig. 9. Temperature vs. time plot at the corner of the insert during machining

Таблица 4
 Table 4

Сводная таблица всех параметров исследовательской работы
 Summary table of all parameters of the research work

Начальный диаметр, мм / Initial Dia., mm	Конечный диаметр, мм / Final Dia., mm	Длина, мм / Length, mm	Время механической обработки, мин / Machining Time in Min.	Объем удаленного материала, мм ³ / Volume Removed in mm ³	Средняя шероховатость поверхности, мкм / Average Surface Roughness in μm	Масса удаленного материала, кг / Mass Removed in kg	Температура, °C / Temp. in °C	Износ по задней поверхности, мкм / Flank Wear in μm
46	20	235	25	316 719,7	4,055	2,486249	71,5	222,872
50	33,5	235	20	254 289,3	3,1	1,996171	63	234,967
33,5	20	215	15	121 959,6	2,9075	0,957383	52,4	119,423
50	32	165	10	191 275,9	3,0375	1,501516	63	126,943

металла. Также наблюдается тенденция изменения температуры твердосплавной сменной пластины инструмента во время обработки. Данная зависимость описывается практически линейной функцией со значением среднеквадратичного отклонения R^2 выше 0,90.

Список литературы

1. *Sheikh-Ahmad J., Davim J.P.* Tool wear in machining processes for composites // *Machining technology for composite materials: principles and practice*. – Cambridge, UK; Philadelphia, PA, 2012. – Ch. 5. – P. 116–153. – DOI: 10.1533/9780857095145.1.116.
2. *Paul S., Chattopadhyay A.B.* Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling // *Machining Science and Technology*. – 2006. – Vol. 10, iss. 1. – P. 87–131. – DOI: 10.1080/10910340500534316.
3. *Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S.* Modeling of tool wear: irreversible energy transformations // *Russian Engineering Research*. – 2018. – Vol. 38, iss. 9. – P. 707–708. – DOI: 10.3103/S1068798X18090290.
4. *Bhuiyan M.S.H., Choudhury I.A.* Review of sensor applications in tool condition monitoring in machining // *Comprehensive Materials Processing*. – 2014. – Vol. 13. – P. 539–569. – DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01330-3.
5. *Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S.* Multi-category micro-milling tool wears monitoring with continuous hidden Markov models // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – Vol. 23, iss. 2. – P. 547–560. – DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.04.010.
6. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning / C. Scheffer, H. Kratz, P.S. Heyns, F. Klocke // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43, iss. 10. – P. 973–985. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00110-X.
7. *Lee K., Dornfeld D.A.* Micro-burr formation and minimization through process control // *Precision Engineering*. – 2005. – Vol. 29, iss. 2. – P. 246–252. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.09.002.
8. *Shaw M.C.* Metal cutting principles. – 2nd ed. – Oxford: Oxford University Press, 2005. – 672 p. – ISBN 9780195142068.
9. *Grzesik W., Zalisz Z.* Wear phenomenon in the hard steel machining using ceramic tools // *Tribology International*. – 2008. – Vol. 41, iss. 8. – P. 802–812. – DOI: 10.1016/j.triboint.2008.02.003.
10. *Dhar N.R., Paul S., Chattopadhyay A.B.* The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels // *Wear*. – 2001. – Vol. 249, iss. 10–11. – P. 932–942. – DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00825-0.
11. *Venugopal K.A., Paul S., Chattopadhyay A.B.* Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling // *Wear*. – 2007. – Vol. 262, iss. 9–10. – P. 1071–1078. – DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.010.
12. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts / T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, J.P. Davim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 189, iss. 1–3. – P. 192–198. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.01.021.
13. Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting / X. Luo, K. Cheng, R. Holt, X. Liu // *Wear*. – 2005. – Vol. 259, iss. 7–12. – P. 1235–1240. – DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.044.
14. *Симсиве Ж.В., Кутышкин А.В., Симсиве Д.Ц.* Оценка износа твердосплавного режущего инструмента при механической обработке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 1. – С. 50–55.
15. *Metal machining: theory and applications / K. Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane, T.H. Childs*. – 1st ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann Publ., 2000. – 408 p. – ISBN 978-0340691595. – ISBN 034069159X.
16. Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels / G.A. Fontalvo, R. Humer, C. Mitterer, K. Sammt, I. Schemmel // *Wear*. – 2006. – Vol. 260, iss. 9–10. – P. 1028–1034. – DOI: 10.1016/j.wear.2005.07.001.
17. *Khrais S.K., Lin Y.J.* Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel // *Wear*. – 2007. – Vol. 262, iss. 1–2. – P. 64–69. – DOI: 10.1016/j.wear.2006.03.052.
18. Influence of buildup in lathe processes on tool life and surface quality / S.G. Emel'yanov, E.I. Yatsun, S.V. Shvets, A.I. Remnev, E.V. Pavlov // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, iss. 12. – P. 1276–1278. – DOI: 10.3103/S1068798X11120100.
19. *Machine tool design handbook / Central Machine Tool Institute (CMTI)*. – New Delhi: McGraw-Hill Education Publ., 1983. – P. 421–588.
20. *Sheikh-Ahmad J.Y., Bailey J.A.* High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fiberboard // *Journal of Wood Science*. – 1999. – Vol. 45, iss. 6. – P. 445–455. – DOI: 10.1007/BF00538952.
21. *Benardos P.G., Vosniakos G.C.* Predicting surface roughness in machining: a review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43, iss. 8. – P. 833–844. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00059-2.
22. *Khara J., Sheladiya M.V., Acharya G.D.* Machining parameters optimization of AISI 4340 // *IUP Journal of Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 43–64.

Приложение 1

Appendix 1

**Программа ЧПУ для проведения экспериментальных работ
CNC Program for the experimental work**

N10 G90 G53 G64 G71 G95; N20 M03; N30 G96 S200 LIMS=1370 M03; N40 T1; N50 M16 D1; N60 M08; N70 G00 X51.5 Z2; N80 X49.5; N90 G01 Z-235 F0.25; N100 G00 X51.5 Z2; N80 X49; N90 G01 Z-235 F0.25; N100 G00 X51 Z2; N110 X48.5; N120 G01 Z-235 F0.25; N130 G00 X50.5 Z2; N140 X48; N150 G01 Z-235 F0.25; N160 G00 X50 Z2; N170 X47.5; N180 G01 Z-235 F0.25; N190 G00 X49.5 Z2; N200 X47;	N210 G01 Z-235 F0.25; N220 G00 X49 Z2; N210 X46.5; N220 G01 Z-235 F0.25; N230 G00 X48.5 Z2; N240 X46; N250 G01 Z-235 F0.25; N260 G00 X48 Z2; N270 X45.5; N280 G01 Z-235 F0.25; N290 G00 X47.5 Z2; N300 X45; N310 G01 Z-235 F0.25; N320 G00 X47 Z2; N330 X44.5; N340 G01 Z-235 F0.25; N350 G00 X46.5 Z2; N360 X44; N370 G01 Z-235 F0.25; N380 G00 X46 Z2; N390 X43.5; N400 G01 Z-235 F0.25; N410 G00 X45.5 Z2;	N420 X43; N430 G01 Z-235 F0.25; N440 G00 X45 Z2; N450 X42.5; N460 G01 Z-235 F0.25; N470 G00 X44.5 Z2; N480 X42; N490 G01 Z-235 F0.25; N500 G00 X44 Z2; N510 X41.5; N520 G01 Z-235 F0.25; N530 G00 X43.5 Z2; N540 X41; N550 G01 Z-235 F0.25; N560 G00 X43 Z2; N570 X40.5; N580 G01 Z-235 F0.25; N590 G00 X42.5 Z2; N600 X40; N610 G01 Z-235 F0.25; N620 G00 X42 Z2; N630 X39.5; N640 G01 Z-235 F0.25; N650 G00 X41.5 Z2;	N660 X39; N670 G01 Z-235 F0.25; N680 G00 X41 Z2; N690 X38.5; N700 G01 Z-235 F0.25; N710 G00 X40.5 Z2; N720 X38; N730 G01 Z-235 F0.25; N740 G00 X40 Z2; N750 X37.5; N760 G01 Z-235 F0.25; N770 G00 X39.5 Z2; N780 X37; N790 G01 Z-235 F0.25; N800 G00 X39 Z2; N810 X36.5; N820 G01 Z-235 F0.25; N830 G00 X38.5 Z2; N840 X36; N850 G01 Z-235 F0.25; N860 G00 X38 Z2; N870 X35.5; N880 G01 Z-235 F0.25; N890 G00 X37.5 Z2;	N900 X35; N910 G01 Z-235 F0.25; N920 G00 X37 Z2; N930 X34.5; N940 G01 Z-235 F0.25; N950 G00 X36.5 Z2; N960 X34; N970 G01 Z-235 F0.25; N980 G00 X36 Z2; N990 X33.5; N1000 G00 X100 Z50; N1010 M09; N1020 M30; %
--	---	--	--	---

Приложение 2

Appendix 2

**Программа MS Excel для фиксирования значения минимального диаметра
на основе времени обработки 15 минут**

MS Excel program for fixing minimum diameter on the basis of time for 15 minutes machining

Pass	L	Length	Diameter	Speed(RPM)	Feed (mm/ min)	Time	Time (sec)	Cumulative time
1	165	165	49,5	1286,101	321,53	0,51	30,79	0,51
2	165	330	49	1299,224	324,81	0,51	30,48	1,02
3	165	495	48,5	1312,618	328,15	0,50	30,17	1,52
4	165	660	48	1326,291	331,57	0,50	29,86	2,02
5	165	825	47,5	1340,252	335,06	0,49	29,55	2,51
6	165	990	47	1354,51	338,63	0,49	29,24	3,00
7	165	1155	46,5	1369,075	342,27	0,48	28,92	3,48

Окончание прил. 2
The End Appendix 2

Pass	L	Length	Diameter	Speed(RPM)	Feed (mm/min)	Time	Time (sec)	Cumulative time
8	165	1320	46	1383,956	345,99	0,48	28,61	3,96
9	165	1485	45,5	1399,164	349,79	0,47	28,30	4,43
10	165	1650	45	1414,711	353,68	0,47	27,99	4,90
11	165	1815	44,5	1430,606	357,65	0,46	27,68	5,36
12	165	1980	44	1446,863	361,72	0,46	27,37	5,82
13	165	2145	43,5	1463,494	365,87	0,45	27,06	6,27
14	165	2310	43	1480,511	370,13	0,45	26,75	6,71
15	165	2475	42,5	1497,929	374,48	0,44	26,44	7,15
16	165	2640	42	1515,761	378,94	0,44	26,13	7,59
17	165	2805	41,5	1534,024	383,51	0,43	25,81	8,02
18	165	2970	41	1552,731	388,18	0,43	25,50	8,44
19	165	3135	40,5	1571,901	392,98	0,42	25,19	8,86
20	165	3300	40	1591,549	397,89	0,41	24,88	9,28
21	165	3465	39,5	1611,696	402,92	0,41	24,57	9,69
22	165	3630	39	1632,358	408,09	0,40	24,26	10,09
23	165	3795	38,5	1653,558	413,39	0,40	23,95	10,49
24	165	3960	38	1675,315	418,83	0,39	23,64	10,89
25	165	4125	37,5	1697,653	424,41	0,39	23,33	11,27
26	165	4290	37	1720,594	430,15	0,38	23,02	11,66
27	165	4455	36,5	1744,164	436,04	0,38	22,70	12,04
28	165	4620	36	1768,388	442,10	0,37	22,39	12,41
29	165	4785	35,5	1793,295	448,32	0,37	22,08	12,78
30	165	4950	35	1818,914	454,73	0,36	21,77	13,14
31	165	5115	34,5	1845,275	461,32	0,36	21,46	13,50
32	165	5280	34	1872,411	468,10	0,35	21,15	13,85
33	165	5445	33,5	1900,358	475,09	0,35	20,84	14,20
34	165	5610	33	1929,151	482,29	0,34	20,53	14,54
35	165	5775	32,5	1958,83	489,71	0,34	20,22	14,88
36	165	5940	32	1989,437	497,36	0,33	19,91	15,21

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Technological Investigation of Effect of Machining Parameter on Tool Life

Manojkumar Sheladiya^{1, 2, a, *}, Shailee Acharya^{3, b}, Ghanshyam Acharya^{4, c}

¹ Gujarat Technological University, Ahmedabad, 382424, India

² Atmiya University, Faculty of Engineering & Technology, Yogidham Gurukul, Kalawad Road, Rajkot, 360005, India

³ Sardar Vallabhbhai Patel Institute of Technology, Affiliated to GTU, Vasad, 388306, India

⁴ Atmiya Institute of Technology and Science, Yogidham Gurukul, Kalawad Road, Rajkot, 360005, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-9154-3355>, mvsheladiya@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6428-8961>, shailee.acharya@gmail.com,

^c <https://orcid.org/0000-0002-3580-3116>, gdacharya@rediffmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 September 2020

Revised: 06 October 2020

Accepted: 15 November 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Tool life

Metal removed

Surface Roughness

Tool bit temperature

Acknowledgment

The group of authors is very much obligated to the Atmiya University, Rajkot for availing the facility of CNC machine and other facilities and VVP College, Rajkot for providing the facility of an optical microscope.

ABSTRACT

Introduction. The machinability is typical criteria to be investigated and different authors suggested different parameters describing its quantification. Different parameters i. e. speed, feed, depth of cut, tool work-piece combination, machine types and its condition, cutting fluid, machinist expertise, etc. are contributing directly to the tool life. The selection of the tool for the machining impacts greatly on the economic viability of the machining in terms of energy usage and tooling costs. **The method of investigation.** The current research emphasis mainly on tool life investigation when machining the mild steel specimens ISRO 50, BIS 1732:1989 at constant cutting speed i.e. 200 m / min. In the industries the mild steel material is commonly used for various products manufacturing. Considering the high demands on productivity and surface finish, machining at 200 m / min is the preferred. The computerized numerical control machine (CNC DX-150) is used for the turning. The four corner insert (TNMG 120408) is used for different machining times i.e. 10, 15, 20 and 25 minutes respectively. The flank wear of the tool is measured with calibrated optical microscope. The temperature of the tool corner during machining is continuously measured for possible impact of temperature on bonding properties of the tool insert and impact on red hardness. **Results and discussion.** The plot of flank wear vs. machining time will give the value of tool life. The other quality output parameter, such as surface roughness, is measured after machining, indicating surface irregularities in root means square value. Efforts have been made to identify the relationship of tool life, machining time, the quantity of metal removed, surface roughness, and tool bit temperature.

For citation: Sheladiya M.V., Acharya S.G., Acharya G.D. Technological investigation of effect of machining parameter on tool life. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 41–53. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-41-53. (In Russian).

References

1. Sheikh-Ahmad J., Davim J.P. Tool wear in machining processes for composites. *Machining technology for composite materials: principles and practice*. Cambridge, UK, Philadelphia, PA, 2012, ch. 5, pp. 116–153. DOI: 10.1533/9780857095145.1.116.
2. Paul S., Chattopadhyay A.B. Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling. *Machining Science and Technology*, 2006, vol. 10, iss. 1, pp. 87–131. DOI: 10.1080/10910340500534316.
3. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Modeling of tool wear: irreversible energy transformations. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, iss. 9, pp. 707–708. DOI: 10.3103/S1068798X18090290.

* Corresponding author

Sheladiya Manojkumar V., M.Tech. (Engineering), Assistant Professor
 Atmiya University, Faculty of Engineering & Technology,
 Yogidham Gurukul, Kalawad Road,
 360005, Rajkot, Gujarat, India.
 Tel.: +91-9898278267, e-mail: mvsheladiya@gmail.com

4. Bhuiyan M.S.H., Choudhury I.A. Review of sensor applications in tool condition monitoring in machining. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 13, pp. 539–569. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01330-3.
5. Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S. Multi-category micro-milling tool wears monitoring with continuous hidden Markov models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, iss. 2, pp. 547–560. DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.04.010.
6. Scheffer C., Kratz H., Heyns P.S., Klocke F. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, iss. 10, pp. 973–985. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00110-X.
7. Lee K., Dornfeld D.A. Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering*, 2005, vol. 29, iss. 2, pp. 246–252. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.09.002.
8. Shaw M.C. *Metal cutting principles*. 2nd ed. Oxford, Oxford University Press, 2005. 672 p. ISBN 9780195142068.
9. Grzesik W., Zalisz Z. Wear phenomenon in the hard steel machining using ceramic tools. *Tribology International*, 2008, vol. 41, iss. 8, pp. 802–812. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.02.003.
10. Dhar N.R., Paul S., Chattopadhyay A.B. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels. *Wear*, 2001, vol. 249, iss. 10–11, pp. 932–942. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00825-0.
11. Venugopal K.A., Paul S., Chattopadhyay A.B. Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear*, 2007, vol. 262, iss. 9–10, pp. 1071–1078. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.010.
12. Özel T., Karpat Y., Figueira L., Davim J.P. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 189, iss. 1–3, pp. 192–198. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.01.021.
13. Luo X., Cheng K., Holt R., Liu X. Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting. *Wear*, 2005, vol. 259, iss. 7–12, pp. 1235–1240. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.044.
14. Simsive J.V., Kutyskin A.V., Simsive D.C. Otsenka iznosa tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta pri mekhanicheskoi obrabotke [Estimation of the tool crater wear of the cutting tool with carbide cutting inserts in turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1, pp. 50–55.
15. Maekawa K., Obikawa T., Yamane Y., Childs T.H. *Metal Machining: Theory and Applications*. 1st ed. Oxford, Butterworth-Heinemann Publ., 2000. 408 p. ISBN 978-0340691595. ISBN 034069159X.
16. Fontalvo G.A., Humer R., Mitterer C., Sammt K., Schemmel I. Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels. *Wear*, 2006, vol. 260, iss. 9–10, pp. 1028–1034. DOI: 10.1016/j.wear.2005.07.001.
17. Khrais S.K., Lin Y.J. Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 2007, vol. 262, iss. 1–2, pp. 64–69. DOI: 10.1016/j.wear.2006.03.052.
18. Emel'yanov S.G., Yatsun E.I., Shvets S.V., Remnev A.I., Pavlov E.V. Influence of buildup in lathe processes on tool life and surface quality. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, iss. 12, pp. 1276–1278. DOI: 10.3103/S1068798X11120100.
19. *Machine tool design handbook*. Central Machine Tool Institute (CMTI). New Delhi, McGraw-Hill Education Publ., 1983, pp. 421–588.
20. Sheikh-Ahmad J.Y., Bailey J.A. High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fiberboard. *Journal of Wood Science*, 1999, vol. 45, iss. 6, pp. 445–455. DOI: 10.1007/BF00538952.
21. Benardos P.G., Vosniakos G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, iss. 8, pp. 833–844. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00059-2.
22. Khara J., Sheladiya M.V., Acharya G.D. Machining parameters optimization of AISI 4340. *IUP Journal of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 12, iss. 2, pp. 43–64.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов

Вилор Заковоротный^a, Валерия Гвинджилия^{b,*}

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

^a <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 14 августа 2020
 Рецензирование: 28 августа 2020
 Принята к печати: 17 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Эффективность резания
 Нелинейная динамика
 Самоорганизация
 Интенсивность изнашивания инструмента
 Технологические режимы

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ: «Разработка теории анализа и синтеза управляемой самоорганизации в динамической системе резания в ходе обработки на примере изготовления деталей на токарных станках», № 19-08-00022; «Разработка методов анализа и синтеза динамической системы резания по критерию минимизации приведенных затрат на изготовление», № 20-38-90074.

АННОТАЦИЯ

Введение. Интенсивность изнашивания инструмента как приращение износа к пути резания характеризует один из важных показателей обработки. Он используется при разработке алгоритмов управления процессом резания, в том числе при расчете траекторий для станков с ЧПУ. По мере увеличения скорости резания достигается ее значение, при котором интенсивность изнашивания минимальна. Ей соответствует оптимальное значение производства тепла в зоне резания, то есть мощности необратимых преобразований подводимой к резанию энергии. Производство тепла зависит от изменяющихся вдоль траектории инструмента параметров динамической системы. В связи с этим на начальном этапе и в процессе обработки необходимо выполнять согласование управления со свойствами динамической системы резания. **Предмет.** В статье приводится исследование и анализ взаимосвязи интенсивности изнашивания инструмента с динамическими свойствами процесса резания, исходя из этого предлагается определение технологических режимов, при которых интенсивность изнашивания минимальна. **Цель работы** заключается в изучении зависимости интенсивности изнашивания инструментов от динамических свойств обработки, исходных и изменяющихся вдоль пути, и создания на этой основе методов согласования технологических режимов с текущей динамикой резания для уменьшения интенсивности изнашивания. **Метод и методология проведения работы.** В работе экспериментально-аналитическими методами выполнены исследования эволюционных изменений свойств системы во взаимосвязи с развитием износа инструмента. Приводятся разработанные математические модели системы резания, отличающиеся от известных тем, что дополнительно моделируется мощность необратимых преобразований энергии механической системы в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. Приводятся зависимости скорости изнашивания от мощности необратимых преобразований, т. е. на заданном временном интервале в приращение износа. Тем самым учитывается зависимость изнашивания от динамических свойств системы резания, в том числе в ходе ее эволюции. **Результаты и обсуждения.** Показано, что свойства эволюции являются чувствительными к малым вариациям параметров динамической системы. Эти вариации вносят существенные изменения в интенсивность изнашивания. В работе раскрывается зависимость изнашивания от свойств динамической системы, т. е. от ее параметров, технологических режимов, биений и других возмущений. **Выводы.** Раскрытие зависимости износостойкости от динамических свойств процесса резания характеризует новые представления о факторах, влияющих на износостойкость.

Для цитирования: Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 54–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Энвериевна, аспирант
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: +7 (918) 583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

Введение

Изнашивание режущих инструментов является одним из основных параметров обработки. В дальнейшем под термином «интенсивность изнашивания» понимается приращение износа по задней грани w инструмента к приращению пути l резания $v_w^{(l)} = dw / dl$, в отличие от ско-

рости изнашивания как приращения износа ко времени $v_w = dw / dt$. При развитии износа изменяются основные характеристики обработки, в том числе показатели качества деталей. Поэтому изучение влияния условий обработки, свойств инструментальных материалов, смазочно-охлаждающей среды, технологических режимов, геометрии инструмента, вибраций и прочего на изнашивание являлось предметом многочисленных исследований [1–5].

При изучении изнашивания большое внимание уделяется теплофизике, в том числе неравновесной нелинейной термодинамике необратимых процессов [1, 2, 6–18]. Показано, что по мере увеличения мощности необратимых преобразований в контактирующих поверхностях образуются диссипативные структуры [6–9]. В их формировании участвуют все элементы системной физики: механические взаимодействия, нелинейная термодинамика, процессы адсорбции, адгезии, диффузии, трибохимии и пр. [10–19]. Этот физически системный подход сформировал синергетическую парадигму методов, направленных на повышение эффективности резания и трения [19, 20].

При оптимизации особое место занимает скорость резания, которая наряду с силами существенно влияет на мощность необратимых преобразований энергии в зоне резания, являющаяся первичным источником всех отмеченных физических явлений. Доказано, что при увеличении скорости достигается ее оптимальное значение, при котором изнашиваемость минимальна. При этом наблюдается переход от адгезионного к диффузионному изнашиванию. Ему соответствует определенная мощность необратимых преобразований энергии, которая при резании может оцениваться температурой. Поэтому выдвинуты гипотезы о существовании оптимальной температуры, при которой изнашиваемость минимальна [21–23]. Также предложены энтропийные и энергетические критерии [1, 2, 8–16].

Показано, что изнашивание зависит не только от мощности, но и от ее предыстории. Исходя из этого предложены математические модели на основе уравнений Вольтерры относительно траектории мощности необратимых преобразований энергии по работе [19, 23, 45]. Как правило, в моделях рассматривается суммарная мощность,

а не ее часть в сопряжении задних граней с заготовкой. Эта мощность зависит от динамических свойств системы. Ее математические модели учитывают подсистемы со стороны инструмента и заготовки, которые взаимодействуют через динамическую связь, формируемую резанием. Учитывается запаздывание сил по отношению к вариациям площади среза, зависимость сил от скорости, регенерация следа [24–36], а также параметрическое самовозбуждение [38]. Изучены проблемы устойчивости, притягивающие множества деформаций, их бифуркации [37–42]. Исследования подчинены раскрытию влияния динамики на выходные характеристики резания [43, 44].

Следующим шагом, диктуемым практикой, является обеспечение технологических режимов и соответствующих им траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС), адаптированных к изменяющимся динамическим свойствам резания (ДСР). В связи с этим в **работе формируется цель** повышения эффективности процессов обработки на станках на основе согласования ТИЭС с эволюционно изменяющимися ДСР, при которых интенсивность изнашивания инструмента минимальна. Для достижения указанной цели выполнено математическое моделирование ДСР, отличающееся от известного тем, что главное внимание уделено моделированию мощности необратимых преобразований в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. На основе математического моделирования доказана подтвержденная практикой эффективность согласования ТИЭС с эволюционной перестройкой ДСР.

Методика исследований

Динамическая система резания

В исследовании используется системно-синергетический подход, согласно которому резание анализируется не изолированно, а как часть единой взаимосвязанной системы [1, 19, 48], состоящей из подсистем, обеспечивающих ТИЭС, подсистемы упругих деформаций и сил, а также подсистем, формирующих неуправляемые внешние возмущения. Система должна обладать эволюционными свойствами, и фактором, вызывающим эволюционные изменения, должна быть

фазовая траектория мощности необратимых преобразований энергии в зоне резания по произведенной работе. При анализе управляемой ДСР используется принцип разделения движений [19, 45, 46], приводящий к анализу динамики в подвижных координатах, задаваемых ТИЭС. Состояние этих подсистем характеризуется своими векторами, которые объединяются в ДСР с помощью связей между ними. Перечислим координаты и воздействия, характеризующие систему, и выясним факторы, их объединяющие.

1. ТИЭС: $\mathbf{I} = \{X, Z, C\}^T \in \mathfrak{R}_1^{(3)}$ и $\mathbf{V}^{(0)} = \{V_1^{(l)} = dX/dt, V_2^{(l)} = dZ/dt, V_3^{(l)} = dC/dt\}^T \in \mathfrak{R}_{V(0)}^{(3)}$ (рис. 1). Для токарного станка это траектории

поперечного $X(t)$, продольного $Z(t)$ суппортов и поворота шпинделя $C(t)$. Производные $dI/dt = \mathbf{V}^{(0)}$ – это их скорости. Здесь очевидна связь $V_3^{(l)}(t) = \pi D \Omega(t)$. Рассматривается циклическая частота Ω . Если скорости представлены в функциях перемещения, то они представляют собой фазовые траектории. Например, траектория скорости продольного суппорта $V_2(Z)$ по оси Z – это желаемая фазовая траектория продольного суппорта.

2. Механические части приводов неидеальны, и они вносят погрешности $\Delta(\mathbf{t}) = \{\Delta_1(t), \Delta_2(t), \Delta_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_1^{(3)}$, зависящие от

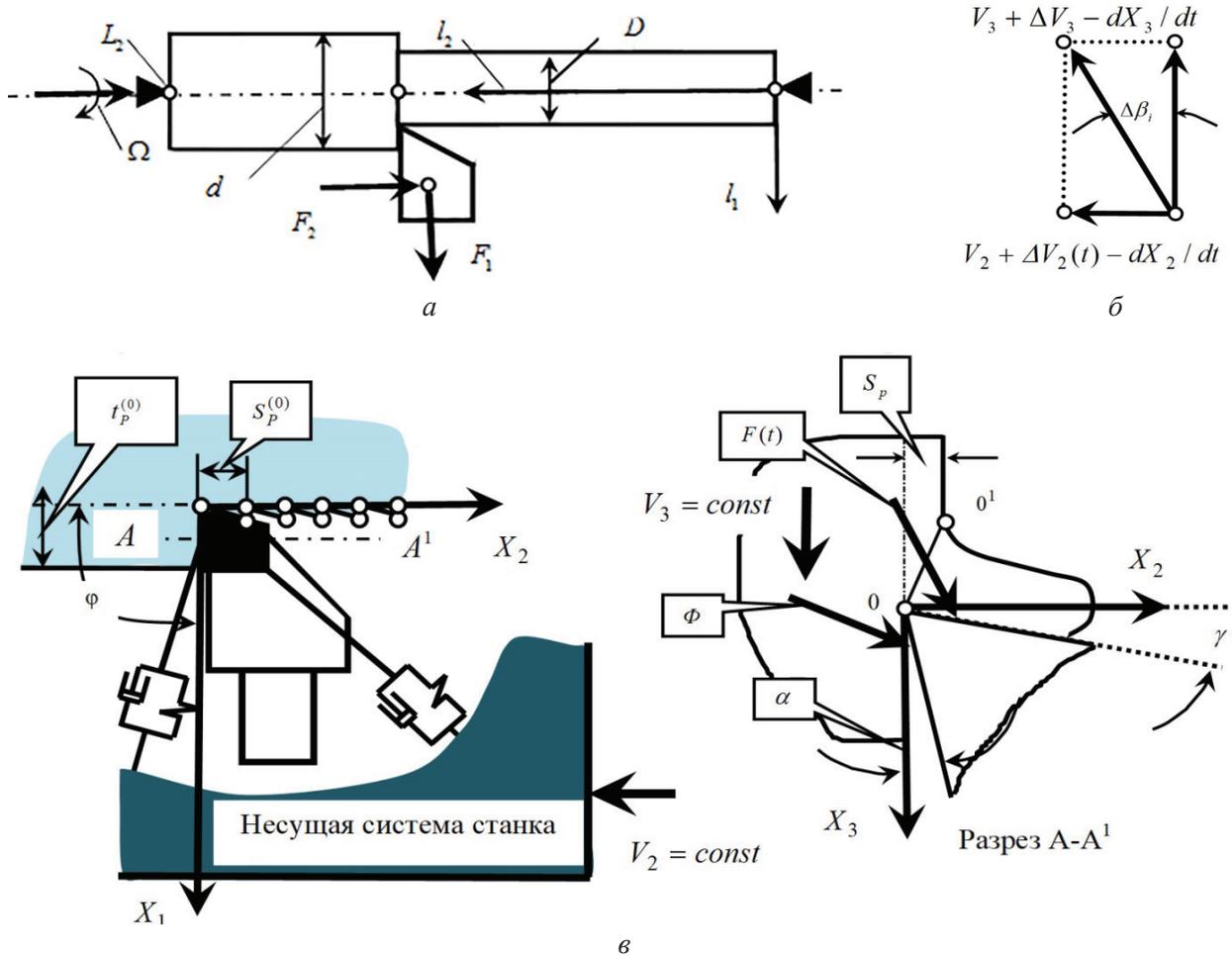


Рис. 1. Схема динамической системы:

a – схема перемещений в пространстве $\mathfrak{R}_1^{(3)}$; *б, в* – ориентация сил резания и деформационных смещений

Fig. 1. Scheme of dynamic system:

a – scheme of displacement in space $\mathfrak{R}_1^{(3)}$; *б, в* – orientation of cutting force and deformational displacement

точности станка и его состояния. Это биения шпинделя, кинематические возмущения и пр. По своей структуре $\Delta(\mathbf{t})$ есть априорно заданные периодические функции времени. Таким образом,

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= \{L_1(t), L_2(t), L_3(t)\}^T = \\ &= \{l_1(t), l_2(t), l_3(t)\}^T + \\ &+ \{\Delta_1(t), \Delta_2(t), \Delta_3(t)\}^T. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь \mathbf{L} – вектор ТИЭС с учетом неуправляемых возмущений. На векторы \mathbf{l} и \mathbf{L} наложены ограничения $\mathbf{l} \subset \mathfrak{R}_D$ и $\mathbf{L} \subset \mathfrak{R}_D$, диктуемые кинематикой, требованиями к шероховатости ($V_2^{(l)}(t) / V_3^{(l)}(t) \leq \delta$) и возможностью систем управления. Здесь \mathfrak{R}_D – это множество допустимых вариаций ТИЭС.

3. Заданные в пределах полосы пропускания серводвигателей станка, траектории \mathbf{l} характеризуют подвижную систему координат, в которой анализируются упругие деформации $\mathbf{x} = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ вершины инструмента относительно несущей системы станка. Не нарушая общности, ограничимся случаем продольного течения абсолютно жесткой детали. Следуя [19], имеем

$$\mathbf{m} \frac{d^2 X}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{dX}{dt} + \mathbf{c} X = \mathbf{F}_\Sigma, \quad (2)$$

где $\mathbf{m} = [m_{s,k}]$, $m_{s,k} = m$, при $s = k$, $m_{s,k} = 0$, при $s \neq k$, $s, k = 1, 2, 3$ (кгс²/мм), $\mathbf{h} = [h_{s,k}]$ (кгс/мм), $\mathbf{c} = [c_{s,k}]$, $s, k = 1, 2, 3$ (кг/мм) – симметричные, положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $\mathbf{F}_\Sigma = \{F_{\Sigma,1}, F_{\Sigma,2}, F_{\Sigma,3}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – вектор сил, действующих на инструмент.

4. Если следовать синергетической концепции анализа, то силы \mathbf{F}_Σ необходимо представить в координатах состояния и внешних воздействиях. Поэтому представим силы \mathbf{F}_Σ в виде суммы $\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F} + \Phi$ сил $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$, дей-

ствующих на переднюю грань инструмента, и $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – на задние его грани.

Такое представление обусловлено тем, что в дальнейшем нам необходимо анализировать износ инструмента по задней грани. Для этого нужно знать мощность необратимых преобразований энергии в области сопряжения задних граней с заготовкой. Вначале рассмотрим силы \mathbf{F} . Для моделирования их в координатах состояния и внешних воздействиях примем гипотезы [24–42]:

1) $Mod[\mathbf{F}]$ зависит от площади срезаемого слоя S ;

2) коэффициент пропорциональности между $Mod[\mathbf{F}]$ и площадью S уменьшается при увеличении скорости резания;

3) учтем запаздывание $Mod[\mathbf{F}]$ по отношению к вариациям S . Ограничимся преобразованием в виде аperiodического звена с постоянной времени T_0 ;

4) ориентация сил в пространстве при малых вариациях \mathbf{X} представима угловыми коэффициентами, т. е. $\mathbf{F}(\mathbf{t}) = F_0(t) \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$, $F_0(t) = Mod[\mathbf{F}]$. Угловые коэффициенты $\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ удовлетворяют условиям нормировки. Тогда

$$\begin{aligned} T_0 dF_0 / dt + F_0 &= \\ &= \rho \{1 + \mu \exp[-\alpha(V_3 + d\Delta_3 / t - dX_3 / dt)]\} \times \\ &\quad \times t_P(t) S_P(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где T_0 – постоянная времени (с); ρ – давление в области малых скоростей (кг/мм²); μ – безразмерный коэффициент; α – коэффициент, определяющий убывание сил при увеличении скорости. Технологические режимы, глубина резания $t_P(t)$, величина подачи $S_P(t)$ и скорость резания $V_3(t)$ связаны с ТИЭС, неуправляемыми возмущениями и деформациями следующими соотношениями:

$$\begin{cases} t_P(t) = t_P^{(0)} + \Delta_1(t) - x_1; \\ S_P(t) = \int_{t-T}^t \{V_2^{(0)}(\xi) + d\Delta_2(t) / dt - v_2(\xi)\} d\xi; \\ V_3(t) = \pi D \Omega + d\Delta_3(t) / dt - dx_3 / dt, \end{cases} \quad (4)$$

где $T = \Omega^{-1}$ – время оборота детали; $V_2^{(0)}$ – скорость подачи суппорта; $t_p^{(0)}$ – глубина резания без учета деформаций и возмущений. Соотношения (4) фактически определяют связь между введенными ранее векторами и объединяют подсистемы в единую ДСР. Параметр T_0 может быть выражен через технологические режимы с учетом деформационных смещений и неуправляемых возмущений

$$T_0(S_p, t_p, V_3) = \frac{\kappa \zeta_c S_p(t) t_p(t)}{V_3(t)}, \quad (5)$$

где κ – коэффициент (мм^{-1}); ζ_c – коэффициент усадки стружки.

Силы Φ , действующие на заднюю главную и вспомогательную грани инструмента, пропорционально возрастают по мере сближения грани инструмента с заготовкой. Сближение определяется изменением углов между задними гранями (главной $\beta_{\Sigma,2}(t)$ и вспомогательной $\beta_{\Sigma,1}(t)$) и направлением скорости. Текущее значение заднего угла $\beta_{\Sigma,i}(t)$, $i = 1, 2$ (рис. 1, б) определяется суммой

$$\beta_{\Sigma,i}(t) = \beta_i - \Delta\beta_i(t), \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

где β_i – задний угол в статике; $\Delta\beta_i = \arctg[V_2(t) / V_3(t)]$ – его уменьшение за счет изменения скоростей. Радиус при вершине инструмента и β_i при неизменных соотношениях скоростей изменяется за счет развития износа w . Кроме этого, учтем зависимость коэффициента трения от скорости. Тогда справедливо

$$\begin{cases} \Phi_1 = \rho_0 \left\{ \int_{t-T}^t [V_2 + d\Delta_2/dt - dX_2/dt] dt \right\} \times \\ \times \exp[\alpha_1 \beta_{\Sigma,1}(t)]; \\ \Phi_2 = \rho_0 [t_p^{(0)} + \Delta_1(t) - X_1(t)] \exp[\alpha_2 \beta_{\Sigma,2}(t)]; \\ \Phi_3 = k_T [\Phi_1 + \Phi_2], \end{cases} \quad (7)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты крутизны; ρ_0 – параметр жесткости; $k_T(V_3) = k_T [1 + \mu_1 \exp(-\alpha_T V_3)]$ – коэффициент трения.

Системы (6, 7), дополненные (2–5), позволяют исследовать устойчивость, притягивающие множества деформаций \mathbf{x} и сил \mathbf{F} , Φ , а также мощность необратимых преобразований энергии в области контакта граней инструмента с заготовкой. Траектории \mathbf{x} , \mathbf{F} , Φ и свойства изменяются, если варьируются параметры подсистем и динамической связи. Они изменяются также при варьировании $\Delta(\mathbf{t})$. Эти свойства, характеризующие замороженное (в смысле эволюционных изменений) состояние системы, было изучено ранее [37–42]. Мощность в области контакта задних граней $N_\Phi(t)$ является скалярной и зависит от суммы мощностей по всем направлениям движения. На основе (7) можно вычислить мощность $N_\Phi(t)$ и работу $A_\Phi(t)$ сил, формируемых в области контакта:

$$\begin{aligned} N_\Phi(t) = & A\Phi_1(t) \left[\frac{d(\Delta_1 - X_1)}{dt} \right] + \\ & + \Phi_2(t) \left[V_2 + \frac{d(\Delta_2 - X_2)}{dt} \right] + \\ & + k_T [\Phi_1(t) + \Phi_2(t)] \left[V_3 + \frac{d(\Delta_3 - X_3)}{dt} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда $A_\Phi(t) = \int_0^t N_\Phi(t) dt$. Дополнительно необходимо учитывать силы упругости, накопленной в зоне резания при переходе обрабатываемого материала через вершину режущего лезвия, и их мощность $N_F(t)$

$$\begin{aligned} N_F(t) &= k_F F_0(t) V_3(t); \\ N(t) &= N_F(t) + N_\Phi(t); \\ A(t) &= A_F(t) + A_\Phi(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где k_F – коэффициент, учитывающий преобразование сил в зоне резания в силы, действующие на задние грани; $N(t)$, $A(t)$ – суммарные мощность и работа. Анализ (8) и (9) показывает, что на выделение энергии оказывают влияние ТИЭС, возмущения, а также параметры подсистем и динамической связи.

Связь износа инструмента с эволюцией динамической системы

Износ вызывает вариации параметров P_i динамической связи

$$p_i = p_{i,0} + \Delta p_i(w), \quad (10)$$

где $p_{i,0}$ – исходный параметр; $\Delta p_i(w)$ – его приращение. При моделировании $N(t)$ и $A(t)$ являются наблюдаемыми.

Износ рассматривается в виде поверхности S_w , площадь которой определялась по сетке, как показано на рис. 2. Геометрию изношенной поверхности удобно аппроксимировать прямоугольником с основанием, равным длине контакта лезвия с заготовкой. Тогда износ w оценивается высотой прямоугольника площадью S_w . Связь $N(t)$ с $v^{(w)}$ не пропорциональна, так как при увеличении $N(t)$ изменяются все основные физические факторы взаимодействий. Эти изменения не мгновенны. В связи с этим при моделировании связи $N(t)$ и $v^{(w)}(t)$ воспользуемся двумя преобразованиями. Вначале рас-

смотрим промежуточную координату $N^{(\Pi)}$, определяемую уравнением Вольтерры [50]:

$$N^{(\Pi)}(t) = \left\{ N(t) + \eta \int_0^t W(t-\xi)N(\xi)d\xi \right\}, \quad (11)$$

где η – коэффициент (c^{-1}); $W(t-\xi)$ – безразмерное ядро. Затем учтем, что скорость изнашивания зависит от $N^{(\Pi)}$ нелинейно:

$$v^{(w)} = N^{(\Pi)} \begin{cases} \eta_1 N^{(\Pi)}, \\ \text{при } N^{(\Pi)} \in (0, N_0^{(\Pi)}); \\ [-(\eta_2 - \eta_1)N_0^{(\Pi)} + \eta_2 N^{(\Pi)}], \\ \text{при } N^{(\Pi)} > N_0^{(\Pi)}, \end{cases} \quad (12)$$

где η_1, η_2 – параметры, имеющие размерность $кг^{-1}$, ($\eta_1 < \eta_2$).

Приведенные представления опираются на макроскопический подход к анализу сложных систем [48]. Ядро интегрального оператора, как нами показано ранее [19, 47], удобно представить в виде

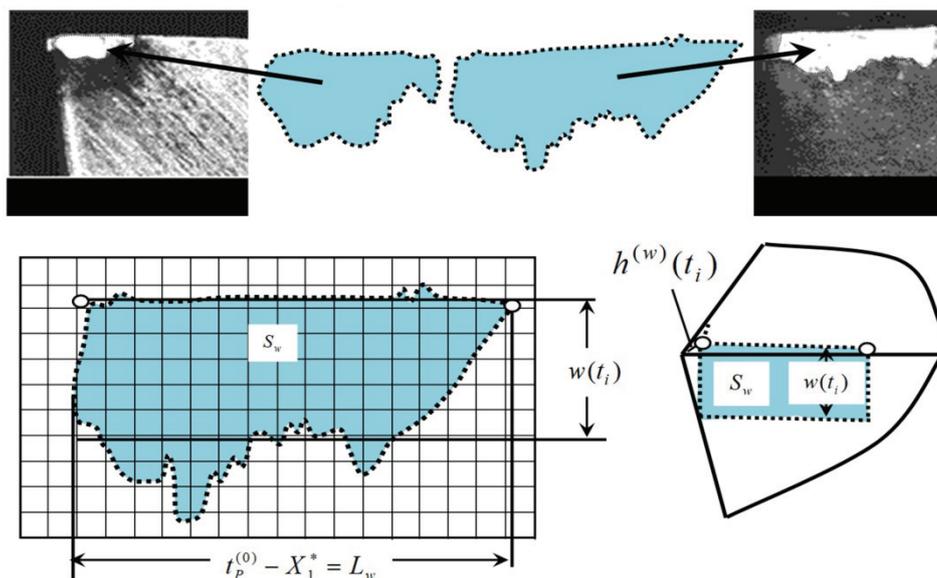


Рис. 2. Примеры фотографий износа и схема оценивания его параметров при продольном точении стали 1X18H9T инструментом из твердого сплава GC2015 на режимах:

$$V_3 = 1,0 \text{ м/с}, t_p^{(0)} = 2,5 \text{ мм}, S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм}$$

Fig. 2. Photo of wear and scheme of estimate wear parameters with longitudinal turning of steel 0.1C18Cr9Ni1Ti by the carbide tool GC2015 on regimes:

$$V_3 = 1,0 \text{ м/с}, t_p^{(0)} = 2,5 \text{ мм}, S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм}$$

$$W(t - \xi) = \left\{ \exp \left[-(T_1)^{-1}(t - \xi) \right] + \mu_v \exp \left[-(T_2)^{-1}(\xi - t) \right] \right\}, \quad (13)$$

где T_1, T_2 – параметры (с); μ_v – безразмерный параметр. Параметры $T_1, T_2, \mu_v, \eta_1, \eta_2$ и η определяются на основе экспериментальной динамики. Ядро оператора (13) моделирует два противоположных процесса изнашивания: адаптации и деградации свойств контакта граней инструмента с заготовкой. Анализ систем (2–9) и (14–16) выполнен численно. Поэтому $N(t)$ можно представить как

$$\mathbf{N} = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_n\}^T, \quad (14)$$

$$N_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{i-1}}^{t_i} N(t) dt.$$

Тогда вместо (14) справедливо

$$N^{(\Pi)}(n\Delta t) = \left\{ N_n + \eta \sum_{i=1}^{i=n} \left[\int_{(i-1)\Delta t}^{i\Delta t} \exp \left(-\frac{n\Delta t - \xi}{T_1} \right) N_i d\xi + \mu_v \int_{(i-1)\Delta t}^{i\Delta t} \exp \left(-\frac{\xi - n\Delta t}{T_2} \right) N_i d\xi \right] \right\},$$

или

$$N^{(\Pi)}(n\Delta t) = \left\{ N_n + \eta T_1 \sum_{i=1}^{i=n} N_i \left[\exp \left(-\frac{(n-i)\Delta t}{T_1} \right) - \exp \left(-\frac{(n-i+1)\Delta t}{T_1} \right) \right] - \mu_v \eta T_2 \sum_{i=1}^{i=n} N_i \times \left[\exp \left(\frac{(n-i)\Delta t}{T_1} \right) - \exp \left(\frac{(n-i+1)\Delta t}{T_1} \right) \right] \right\}. \quad (15)$$

Если $N_{i-1} = N_i = N$, то

$$N^{(\Pi)}(n\Delta t) = \left\{ N + \eta T_1 N \left[1 - \exp \left(-\frac{n\Delta t}{T_1} \right) \right] - \mu_v \eta T_2 N \left[1 - \exp \left(\frac{n\Delta t}{T_1} \right) \right] \right\}.$$

Таким образом, вариации N_i «окрашивают» развитие износа за счет изменения параметров p_i , зависящих от износа и влияющих на динамические свойства системы. При этом, как показано ранее [37–42], в ходе эволюции наблюдаются бифуркации притягивающих множеств деформаций, и точки бифуркации могут иметь высокую чувствительность к малым вариациям начальных параметров $p_{i,0}$ и возмущений [44]. Эволюционные свойства зависят от p_i и ТИЭС.

В связи с этим имеет место проблема выбора ТИЭС, при которых путь резания при достижении критического износа максимален. Для определения интенсивности изнашивания $v_w^{(l)}$ можно воспользоваться очевидным соотношением

$$v_w^{(l)} = \frac{dw}{dl} = \frac{v_w}{V_\Sigma}, \quad (16)$$

где $V_\Sigma = \text{Mod}[d\mathbf{L}^{(\Phi)} / dt]$ – проекция суммарной скорости на направление движения.

Результаты и их обсуждение

Оптимизация траекторий исполнительных элементов

При выборе ТИЭС, при которых интенсивность изнашивания минимальна, главное значение имеет траектория скорости резания $V_3(Z)$. Рассмотрим проблему оптимизации на примере продольного точения вала штуцера гидросистемы вертолета МИ-29 из аустенитной стали 08X15H24B4TP в условиях ПАО «Роствертол». Обработка выполнялась неперетачиваемыми пластинами фирмы SANDVIK Coromant из сплава GC2015, форма пластины – «W». Геометрия: $\alpha = 2^\circ$; $\gamma = 6^\circ$; $\varphi = 90^\circ$. Обработка производилась без СОЖ на станке L440 с ЧПУ (система Siemens Sinumerik 828 D Basis T). В подсистеме инструмента жесткости совпадают с осями $\mathfrak{R}^{(3)}$, так как $\varphi = 90^\circ$; $\mathbf{m} = [m_{s,k}]$, $m_{s,s} = m_0$; $\mathbf{h} = [h_{s,k}]$, $h_{s,s} = h_0$, $m_{s,k} = h_{s,k} = 0$ при $s \neq k$, $s, k = 1, 2, 3$. Подсистема инструмента: $c_{1,0} = 3000$ кг/мм, $c_{2,0} = 1000$ кг/мм, $c_{3,0} = 600$ кг/мм; $h_0 = 5,0$ кг·с/мм; $m_0 = 0,025$ кг·с²/мм. Параметры динамической

связи даны в табл. 1, а интегрального оператора – в табл. 2.

При идентификации параметров использованы методы экспериментальной динамики, подробно изложенные в работах [19, 49, 51–53]. Приведем пример эволюции динамической системы резания и износа (рис. 3). Сплошной линией на диаграмме износа показана вычисленная траектория, треугольниками – экспериментальные точки. Известно [4], что вариации глубины $t_p^{(0)}$ мало влияют на интенсивность изнашивания $v_w^{(l)}$. Это связано с тем, что приведенные к единице контактной поверхности характеристики взаимодействий остаются практически неизменными при условии, что равновесие системы остается асимптотически устойчивым. Однако вариации глубины $t_p^{(0)}$ принципиально изменяют условия самовозбуждения, зависящие от отношения $\rho t_p^{(0)}$ к приведенной суммарной жесткости. В результате изменение глубины с 0,5 до 3,0 мм увеличивает среднюю интенсивность изнашивания более чем в два раза.

Это обусловлено потерей устойчивости равновесия, формированием различных притягивающих множеств деформаций вдоль траектории движения суппорта, их бифуркациями и, как следствие, изменением сил, которые синфазно со скоростью увеличиваются, вызы-

вая всплески мощности. При каждом всплеске изменяется соотношение между адгезионными, диффузионными и другими физическими взаимодействиями. У системы обнаруживаются свойства эмерджентности, естественные в сложных многосвязных нелинейных системах.

Пример показывает, что $v_w^{(l)}$ зависит от свойств ДСР, которые могут изменяться не только от параметров взаимодействующих подсистем и объединяющей их динамической связи, но и от управляемых и неуправляемых возмущений, а также в ходе эволюции системы. Пример также показывает, что вариации интенсивности изнашивания при определенных технологических режимах могут быть весьма чувствительными даже к малым их вариациям. В связи с этим оптимальные технологические режимы, например, рекомендованные фирмой SANDVIK Coromant, необходимо корректировать в зависимости от состояния станка, определяемого неуправляемыми возмущениями и параметрами динамических подсистем. Коррекция состоит, прежде всего, в выборе скорости резания, при которой мощность необратимых преобразований в сопряжении граней инструмента с заготовкой соответствует оптимальному значению. В этом и заключается согласование технологических режимов и соответствующих им ТИЭС с динамическими свойствами системы. Здесь возможно два подхода.

Таблица 1

Table 1

Параметры динамической связи процесса резания

The parameters dynamic link of the cutting process

ρ , кг/мм ²	$\alpha = \alpha_T$, с/м	$\mu = \mu_1$	ρ_0 , кг/мм	k , мм ⁻¹	$\alpha_1 = \alpha_2$, рад ⁻¹	k_T
500	2,0	0,5	50,0	5×10^{-3}	20	0,2

Таблица 2

Table 2

Параметры интегрального уравнения

The parameters of integral equation

Скорость, м/с	T_1 , с	T_2 , с	η , с ⁻¹	η_1 , кг ⁻¹	η_2 , кг ⁻¹
1,2	13	30	0,5	8×10^{-6}	3×10^{-6}

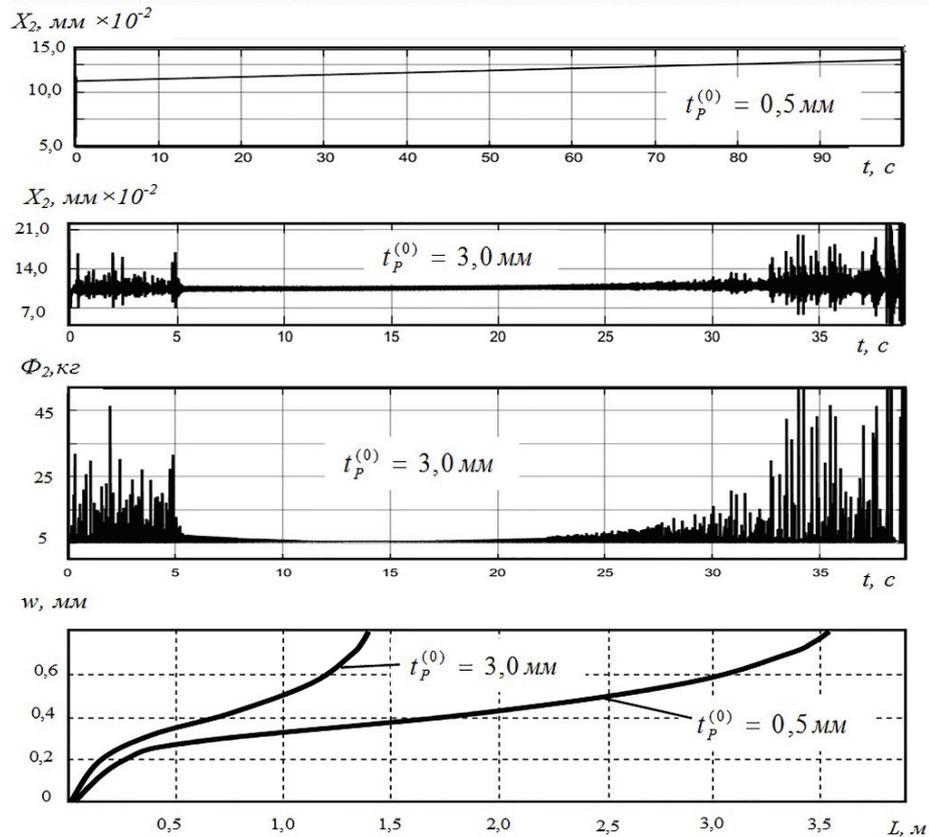


Рис. 3. Пример изменений траектории деформационных смещений в направлении X_2 соответствующих сил Φ_2 , действующих на заднюю грань, и эволюции износа. Режимы резания:

$$S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм}; V_3^{(0)} = 1,2 \text{ м/с}; t_p^{(0)} = \text{var}$$

Fig. 3. Changes of deformational displacement trajectories in direction X_2 , corresponding forces Φ_2 are acting on back side and evolution of wear. Cutting regimes:

$$S_p^{(0)} = 0,1 \text{ mm}; V_3^{(0)} = 1,2 \text{ m/s}; t_p^{(0)} = \text{var}$$

Первый подход не учитывает эволюцию системы. Тогда определяются неизменные в течение всего времени функционирования технологические режимы, соответствующие им ТИЭС и программа ЧПУ. Приведем пример реализации такого подхода.

Рассмотрим изменения $v_w^{(l)}$ от $V_3(Z) = \text{const}$ при различных режимах и радиальных биениях шпиндельной группы. Частота биений зависит от V_3 , а при $V_3(Z) = \text{const}$ – от диаметра вала. Приведенные зависимости (см. рис. 4, а) показывают, что оптимальная по износостойкости скорость резания остается практически неизменной при вариациях глубины резания до $t_p^{(0)} = 1,5$ мм. В этом случае система остается устойчивой на всем протяжении эволюционной

траектории. Ранее показано [49, 50], что при увеличении скорости резания существует ограниченный ее диапазон, в котором запас устойчивости максимален. Он ограничен снизу свойствами запаздывания сил по отношению к вариациям площади среза (3, 5), а сверху – условиями параметрического самовозбуждения. Действительно, при увеличении амплитуды радиальных биений шпиндельной группы, во-первых, уменьшается стойкость, во-вторых, оптимальное значение скорости смещается в область малых значений (рис. 4, б). Приведенные на рис. 4 результаты получены для режимов резания, которые не изменялись вдоль траектории движения инструмента относительно заготовки. Анализ показывает, что в ходе эволюции имеет место монотонное или быстрое (в результате бифуркаций притягивающих множеств деформаций) изменение сил,

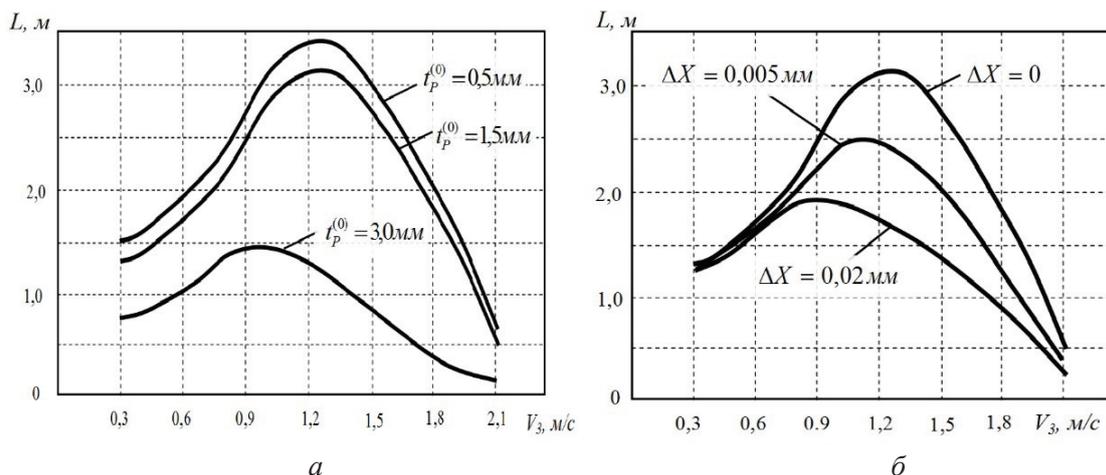


Рис. 4. Примеры изменения пути резания при достижении износа 0,8 мм по задней грани:

a – изменение пути резания в зависимости от глубины $t_p^{(0)}$; b – изменение пути резания в зависимости от амплитуды радиальных биений ΔX

Fig.4. Changes of cutting path with achieving wear 0,8 mm on the back side:

a – changes of cutting path in depends on cutting depth $t_p^{(0)}$; b – changes of cutting path in depends on amplitude of radial beating ΔX

мгновенных и средних на временном отрезке, действующих на задние грани инструмента (см. пример на рис. 3). Поэтому тезис об оптимальных значениях мощности необратимых преобразований энергии в областях сопряжения граней является справедливым лишь на начальной стадии эволюции ДСР.

Если обеспечить достаточный запас устойчивости системы, то удастся на рассмотренном примере обеспечить путь резания до критического износа 0,8 мм в среднем на уровне 3000 м. Во избежание недоразумений отметим, что это не путь суппорта, а путь вершины инструмента относительно заготовки. Максимальный путь до критического износа будет существенно сокращаться в случае потери устойчивости равновесия, увеличения биений шпинделя и (или) других возмущений (например, кинематических). Другими словами, изнашиваемость зависит как от параметров динамической системы резания, так и от состояния и точности узлов станка, обеспечивающих движение исполнительных элементов. Таким образом, первый подход позволяет согласовать режимы и, следовательно, программу ЧПУ с динамическими свойствами системы без учета эволюции системы резания.

Второй подход принимает во внимание динамическую перестройку системы резания в процессе обработки. Так как в ходе эволюции изменяются динамические свойства системы, влияющие на мощность необратимых преобразований энергии в сопряжении граней инструмента и заготовки, то каждому этапу эволюционных изменений должны соответствовать свои оптимальные режимы и ТИЭС. Понятие оптимальных технологических режимов (неизменной точки в пространстве технологических режимов) с учетом эволюции системы преобразуется в понятие оптимальной траектории технологических режимов. Оптимальным траекториям соответствует перестраиваемая программа ЧПУ. Однако непрерывное изменение программы сопряжено с вычислительными сложностями. Поэтому в условиях ПАО «Роствертол» было принято решение о дискретной перестройке программы таким образом, что после обработки каждой детали программными методами на основе априорной информации осуществляется изменение программы. В приведенном примере рассматривались три перестраиваемые программы, которым соответствовала обработка трех деталей. Расчеты показывают, что при переходе к оптимизации траектории технологических режимов вдоль траектории движения инструмента увеличивается стойкость инструмента на 20...30 % для случая, когда в ходе эволюции равновесие системы в подвижной системе координат является асимптотически устойчивым. В зависимости от динамической системы резания стойкость можно увеличить в 5...6 раз, если в ходе эволюции

яющие на мощность необратимых преобразований энергии в сопряжении граней инструмента и заготовки, то каждому этапу эволюционных изменений должны соответствовать свои оптимальные режимы и ТИЭС. Понятие оптимальных технологических режимов (неизменной точки в пространстве технологических режимов) с учетом эволюции системы преобразуется в понятие оптимальной траектории технологических режимов. Оптимальным траекториям соответствует перестраиваемая программа ЧПУ. Однако непрерывное изменение программы сопряжено с вычислительными сложностями. Поэтому в условиях ПАО «Роствертол» было принято решение о дискретной перестройке программы таким образом, что после обработки каждой детали программными методами на основе априорной информации осуществляется изменение программы. В приведенном примере рассматривались три перестраиваемые программы, которым соответствовала обработка трех деталей. Расчеты показывают, что при переходе к оптимизации траектории технологических режимов вдоль траектории движения инструмента увеличивается стойкость инструмента на 20...30 % для случая, когда в ходе эволюции равновесие системы в подвижной системе координат является асимптотически устойчивым. В зависимости от динамической системы резания стойкость можно увеличить в 5...6 раз, если в ходе эволюции

равновесие системы неустойчиво и в системе в ходе эволюции наблюдаются бифуркации притягивающих множеств деформаций и сил. Этот вывод сделан на основе выполнения цифрового моделирования эволюционной системы резания с использованием при моделировании алгоритмов стабилизации мощности необратимых преобразований в сопряжении главной боковой грани инструмента и заготовки путем изменения скорости резания. Дискретная же перестройка программы, проверенная в условиях ПАО «Роствертол», позволяет повысить эффективность изготовления в стоимостном выражении в 1,2 раза.

Заключение

Приращение износа инструмента по пути, то есть интенсивность его изнашивания, зависит от мощности необратимых преобразований энергии в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. Причем существует оптимальное ее значение, при котором интенсивность изнашивания минимальна. Показано, что эта мощность зависит от свойств динамической системы резания, характеризующихся притягивающими множествами деформационных смещений вершины инструмента относительно заготовки, и сил, рассматриваемых в подвижной системе координат исполнительных элементов станка, задаваемых программой ЧПУ. Поэтому для каждой динамической системы резания, свойства которой изменяются, существуют такие совокупности режимов – прежде всего, скорости резания, – при которых интенсивность изнашивания минимальна. Приведенные математические модели и разработанные методики позволяют определять технологические режимы – прежде всего, скорость резания, при которой для заданной динамической системы мощность необратимых преобразований энергии является оптимальной по критерию интенсивности изнашивания инструмента. Определение технологических режимов в этом случае есть синергетическое согласование внешнего управления с внутренней динамикой системы резания, характерной для рассматриваемого станка. Кроме этого, процесс резания на конкретном станке обладает свойством эволюционной перестройки свойств. Поэтому эффективность процесса резания можно дополнительно

повысить на основе согласования в ходе эволюции технологических режимов и изменяющихся свойств системы. В этом случае вводится понятие оптимальной траектории технологических режимов, которой соответствует перестраиваемая программа ЧПУ, согласованная с эволюцией динамической системы резания. При практической реализации перестраиваемой программы, как показано опытно-промышленными испытаниями, удобно выполнять изменение программы дискретно после обработки каждой детали из партии. Приведенные материалы позволяют не только объяснить экспериментально известные факты зависимости изнашивания от динамических особенностей процесса резания, но и определить неиспользуемые направления увеличения эффективности обработки на конкретном станке.

Список литературы

1. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке / Донской государственный технический университет. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2019. – 289 с. – ISBN 978-5-7890-1669-5.
2. *Старков В.К.* Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0.
3. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
4. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
5. *Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С.* Резание металлов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 447 с. – ISBN 5-7038-1823-0.
6. *Бершадский Л.И.* Самоорганизация трибосистем и концепция износостойкости // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 6. – С. 1077–1094.
7. *Костецкий Б.И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Проблемы трения и изнашивания. – 1986. – № 6. – С. 287–295.
8. *Мигранов М.Ш.* Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65–71.
9. *Ким В.А., Якубов Ч.Ф.* Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 12. – С. 35–45. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-35-45.



10. Каримов И.Г. Влияние температуры резания на энергетические параметры контакта инструмента с деталью // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 44 (49). – С. 85–89.
11. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction / J.R. Gomez-Solano, C. July, J. Mehl, C. Bechinger // *New Journal of Physics*. – 2015. – Vol. 17. – P. 045026. – DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
12. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach // *Tribology in Industry*. – 2014. – Vol. 36, N 4. – P. 341–347.
13. Bryant M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear // *FME Transactions*. – 2009. – Vol. 37, no. 2. – P. 55–60. – DOI: 10.3390/e12061345.
14. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear // *Encyclopedia of Tribology*. – Boston, MA: Springer, 2013. – P. 3622–3636. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
15. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs // *World Applied Sciences Journal*. – 2014. – Vol. 30 (8). – P. 958–963. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
16. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes // *Computers and Industrial Engineering*. – 2006. – Vol. 50, N 12. – P. 15–34. – DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.
17. Key role of excess atomic volume in structural rearrangements at the front of moving partial dislocations in copper nanocrystals / S.G. Psakhie, K.P. Zolnikov, D.S. Kryzhevich, A.V. Korchuganov // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 3867. – DOI: 10.1038/s41598-019-40409-9.
18. Bicanic N. Discrete element methods // *Encyclopedia of Computational Mechanics*. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 2017. – P. 1–38. – DOI: 10.1002/0470091355.ecm006.
19. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания: синергетический подход. – Ростов н/Д.: Терра, 2006. – 880 с.
20. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 12. – С. 19–24.
21. Постнов В.В., Шафигов А.А. Разработка эволюционной модели изнашивания режущего инструмента для управления процессом обработки // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 11, № 2 (29). – С. 139–146.
22. Патент 2538750 Российская Федерация. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки / Козочкин М.П., Федоров С.В., Терешин М.В. – № 2013123625/02; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.01.2015.
23. Зариктуев В.Ц. Автоматизация процессов на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.12, № 4. – С. 14–19.
24. Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2017. – № 2 (51). – С. 9–23.
25. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gousskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2002. – Vol. 7. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/s1007-5704(02)00014-x.
26. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system / Y.-C. Kao, N.-T. Nguyen, M.-S. Chen, S.T. Su // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 77, N 9–12. – P. 1793–1809. – DOI: 10.1007/s00170-014-6550-8.
27. Approximate analytical solutions for primary chatter in the non-linear metal cutting model / J. Warminski, G. Litak, M.P. Cartmell, R. Khanin, M. Wiercigroch // *Journal of Sound and Vibration*. – 2003. – Vol. 259 (4). – P. 917–933. – DOI: 10.1006/jsvi.2002.5129.
28. Stepan G., Insperge T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2005. – Vol. 15, N 9. – P. 2783–2798. – DOI: 10.1142/S0218127405013642.
29. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process // *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*. – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 793–819. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0755.
30. Davies M.A., Pratt J.R. The stability of low immersion milling // *CIRP Annals*. – 2000. – Vol. 49. – P. 37–40. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62891-1.
31. Stability prediction for low radial immersion milling / M.A. Davies, J.R. Pratt, B.S. Dutterer, T.J. Burns // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2002. – Vol. 124. – P. 217–225. – DOI: 10.1115/1.1455030.
32. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling / R.P.H. Faassen, N. van de Wouw, J.A.J. Osterling, H. Nijmeijer // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43. – P. 1437–1446. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8.
33. Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation – Part 1: An analytical solution // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 126. – P. 467–474. – DOI: 10.1115/1.1765137.
34. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness / G. Peigne, H. Paris, D. Brissaud, A. Gousskov // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.

- ture. – 2004. – Vol. 44. – P. 1133–1142. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012.
35. Szalai R., Stepan G., Hogan S.J. Global dynamics of low immersion high-speed milling // *Chaos*. – 2004. – Vol. 14. – P. 1069–1077. – DOI: 10.1063/1.1807395.
36. Hasnul H. The parametric effect and optimization on JIS S45C steel turning // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2011. – Vol. 3, N 5. – P. 4479–4487.
37. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotny, A.D. Lukyanov, A.A. Gubanova, V.V. Khristoforova // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
38. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2014. – Vol. 24 (9). – P. 189–201. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.
39. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 89. – P. 167–176. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.
40. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal – cutting tool // *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2015. – Vol. 10. – P. 102–116.
41. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Attractive manifolds in end milling // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, N 2. – P. 158–163. – DOI: 10.3103/S1068798X17020198.
42. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. – 2018. – Т. 26, № 5. – С. 20–38. – DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.
43. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Зависимость изнашивания инструмента и параметров качества формируемой резанием поверхности от динамических характеристик // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 31–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46.
44. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.
45. Понтрягин Л.С. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – 576 с. – ISBN 5-02-14410-X.
46. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений с малыми параметрами при старших производных // *Математический сборник*. – 1952. – Т. 31, № 3. – С. 575–586.
47. Мышкис А.Д. Математика для вузов: специальные курсы. – М.: Наука, 1971. – 640 с.
48. Haken H. Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 251 p.
49. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2017. – № 2 (194). – С. 52–61. – DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-52-61.
50. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами // *СТИН*. – 2016. – № 8. – С. 27–33.
51. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2011. – № 2 (160). – С. 38–46.
52. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 11, № 2 (53). – С. 137–146.
53. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 11, № 3 (54). – С. 301–311.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Influence of Cutting Dynamic on the Selection of the Technological Regimes to Ensure Minimal Wear of Cutting Tools

Vilor Zakovorotny^a, Valery Gvindjiliya^{b, *}

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

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  sinedden@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 August 2020

Revised: 28 August 2020

Accepted: 17 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Cutting efficiency
 Nonlinear dynamic
 Self-organization
 Wear tool intensity
 Technological regimes

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research projects: “Development of the theory of analysis and synthesis of controlled self-organization in a dynamic cutting system during processing on the example of manufacturing parts on lathes”, No. 19-08-00022; “Development of methods for analysis and synthesis of a dynamic cutting system based on the criterion of minimizing the reduced manufacturing costs”, No. 20-38-90074.

ABSTRACT

Introduction. The intensity of tool wear, as an increment of wear to the cutting path, characterizes one of the important processing indicators. It is used in the development of algorithms for controlling the cutting process, including the calculation of trajectories in CNC machines. As the cutting speed increases, there is a value at which the wear rate is minimal. It corresponds to the optimal value of heat production in the cutting zone, that is, the power of irreversible transformations of the energy supplied to cutting. Heat production depends on the dynamic system parameters that change along the tool path. In this regard, at the initial stage and during processing, it is necessary to coordinate the control with the properties of the dynamic cutting system. **Subject.** The paper offers a study and analysis of the relationship between the tool wear rate and the dynamic properties of the cutting process, and on this basis, the definition of technological modes in which the wear rate is minimal. **The purpose of this work** is to study the dependence of the tool wear rate on the initial and changing dynamic properties of processing along the path, and to create on this basis methods for matching technological modes with the current cutting dynamics to reduce the wear rate. **Method and methodology of the work.** In this paper, experimental and analytical methods are used to study the evolutionary changes in the properties of the system in relation to the development of tool wear. The developed mathematical models of the cutting system are presented, which differ from the known ones in that the power of irreversible energy transformations of the mechanical system in the interface of the back faces of the tool with the workpiece is additionally modeled. The dependence of the wear rate on the power of irreversible transformations, that is, on a given time interval in the increment of wear, is given. This takes into account the dependence of wear on the dynamic properties of the cutting system, including during its evolution. **Results and discussions.** It is shown that the properties of evolution are sensitive to small variations in the parameters of the dynamical system. These variations make significant changes in the wear rate. The paper reveals the dependence of wear on the properties of a dynamic system, that is, on its parameters, technological modes, beats, and other perturbations. **Conclusions.** The disclosure of the dependence of wear resistance on the dynamic properties of the cutting process characterizes new ideas about the factors that affect wear resistance.

For citation: Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of cutting dynamic on the selection of the technological regimes to ensure minimal wear of cutting tools. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 54–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70. (In Russian).

References

1. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoy obrabotke* [Synergetics of tool wear in blade processing]. Rostov-on-Don, Don state technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 9785789016695.
2. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p. ISBN 978-5-94275-460-0.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Post-graduate Student
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square,
 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
 Tel.: +7 (918) 583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

3. Loladze T.N. *Prochnost' i iznosostoikost' rezhushchego instrumenta* [Strength and wear resistance of the cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 320 p.
4. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
5. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie metallov: termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosvyazei pri rezanii* [Metal cutting: a thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 447 p. ISBN 5-7038-1823-0.
6. Bershadskii L.I. Samoorganizatsiya tribosistem i kontseptsiya iznosostoikosti [Self-organization of tribosystems and the concept of wear resistance]. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 1992, vol. 13, no. 6, pp. 1077–1094. (In Russian).
7. Kostetskii B.I. Strukturno-energeticheskaya prisposoblivaemost' materialov pri trenii [Structural and energy adaptability of materials under friction]. *Problemy treniya i iznashivaniya = Friction and Wear Problems*, 1986, no. 6, pp. 287–295.
8. Migranov M.Sh. Issledovaniya iznashivaniya instrumental'nykh materialov i pokrytii s pozitsii termodinamiki i samoorganizatsii [Research of wear of tool materials and coatings from the positions of thermodynamics and self-organization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–71.
9. Kim V.A., Yakubov Ch.F. Dissipativnaya struktura kontaktno-frikcionnogo vzaimodejstviya [Dissipative structure of contact-friction interaction at metal cutting]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, no. 12, pp. 35–45. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-35-45.
10. Karimov I.G. Vliyanie temperatury rezaniya na energeticheskie parametry kontakta instrumenta s detal'yu [Influence of the cutting temperature on the energy parameters of the tool contact with the part]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 16, no. 44 (49), pp. 85–89.
11. Gomez-Solano J.R., July C., Mehl J., Bechinger C. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, vol. 17, p. 045026. DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
12. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.
13. Bryant M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear. *FME Transactions*, 2009, vol. 37, no. 2, pp. 55–60. DOI: 10.3390/e12061345.
14. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, Springer, 2013, pp. 3622–3636. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
15. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. *World Applied Sciences Journal*, 2014, no. 30 (8), pp. 958–963. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
16. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 12, pp. 15–34. DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.
17. Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V. Key role of excess atomic volume in structural rearrangements at the front of moving partial dislocations in copper nanocrystals. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, p. 3867. DOI: 10.1038/s41598-019-40409-9.
18. Bicanic N. Discrete element methods. *Encyclopedia of Computational Mechanics*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2017, pp. 1–38. DOI: 10.1002/0470091355.ecm006.
19. Zakovorotnyi V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessa rezaniya: sinergeticheskii podkhod* [Dynamics of the cutting process]. Rostov-on-Don, Terra Publ., 2006. 880 p.
20. Zakovorotnyi V.L., Shapovalov V.V. *Dinamika transportnykh tribosistem* [Dynamics of transport tribosystem]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in Machine-Building, Instrument-Making*, 2005, no. 12, pp. 19–24.
21. Postnov V.V., Shafikov A.A. Razrabotka evolyutsionnoi modeli iznashivaniya rezhushchego instrumenta dlya upravleniya protsessom obrabotki [Development of an evolutionary model of cutting tool wear to control the processing process]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 11, no. 2 (29), pp. 139–146.
22. Kozochkin M.P., Fedorov S.V., Tereshin M.V. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya v protsesse metalloobrabotki* [Method for determining the optimal cutting speed in the process of Metalworking]. Patent RF, no. 2538750, 2015.



23. Zariktuev V.Ts. Avtomatizatsiya protsessov na osnove polozheniya ob optimal'noi temperature rezaniya [Automatization of process based on concept of optimal cutting temperature]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 14–19.
24. Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineinye zadachi dinamiki protsessov rezaniya [Nonlinear problems of cutting process dynamics]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical engineering and engineering education*, 2017, no. 2 (51), pp. 9–23.
25. Gousskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, vol. 7, pp. 207–221. DOI: 10.1016/s1007-5704(02)00014-x.
26. Kao Y.-C., Nguyen N.-T., Chen M.-S., Su S.T. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, no. 9–12, pp. 1793–1809. DOI: 10.1007/s00170-014-6550-8.
27. Warminski J., Litak G., Cartmell M.P., Khanin R., Wiercigroch M. Approximate analytical solutions for primary chatter in the non-linear metal cutting model. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 259 (4), pp. 917–933. DOI: 10.1006/jsvi.2002.5129.
28. Stepan G., Insperge T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.
29. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 793–819. DOI: 10.1098/rsta.2000.0755.
30. Davies M.A., Pratt J.R. The stability of low immersion milling. *CIRP Annals*, 2000, vol. 49, pp. 37–40. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62891-1.
31. Davies M.A., Pratt J.R., Dutterer B.S., Burns T.J. Stability prediction for low radial immersion milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, pp. 217–225. DOI: 10.1115/1.1455030.
32. Faassen R.P.H., Wouw N. van de, Osterling J.A.J., Nijmeijer H. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1437–1446. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8.
33. Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation – Part 1: An analytical solution. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, pp. 467–474. DOI: 10.1115/1.1765137.
34. Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gousskov A. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 1133–1142. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012.
35. Szalai R., Stepan G., Hogan S.J. Global dynamics of low immersion high-speed milling. *Chaos*, 2004, vol. 14, pp. 1069–1077. DOI: 10.1063/1.1807395.
36. Hasnul H. The parametric effect and optimization on JIS S45C steel turning. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 4479–4487.
37. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 368, pp. 174–190. DOI: /10.1016/j.jsv.2016.01.020.
38. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, 24 (9), pp. 189–201. DOI: 10.1142/S0218127414501156.
39. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 89, pp. 167–176. DOI: /10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.
40. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal – cutting tool. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2015, vol. 10, pp. 102–116.
41. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Attractive manifolds in end milling. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 158–163. DOI: 10.3103/S1068798X17020198.
42. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Bifurkatsii prityagivayushchikh mnozhestv deformatsionnykh smeshchenii rezhushchego instrumenta v khode evolyutsii svoystv protsessa obrabotki [Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 20–38. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.
43. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Zavisimost' iznashivaniya instrumenta i parametrov kachestva formiruemoi rezaniem poverkhnosti ot dinamicheskikh kharakteristik [The dependence of tool wear and quality parameters of

the surface being cut on dynamic characteristics]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 31–46. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46.

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

45. Pontryagin L.S. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 576 p. ISBN 5-02-14410-X.

46. Tikhonov A.N. Sistemy differentsial'nykh uravnenii s malymi parametrami pri starshikh proizvodnykh [Systems of differential equations containing small parameters in the derivatives]. *Matematicheskii sbornik = Sbornik: Mathematics*, 1952, vol. 31, no. 3, pp. 575–586. (In Russian).

47. Myshkis A.D. *Matematika dlya vtuzov: spetsial'nye kursy* [Mathematics for higher education institutions: special courses]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 640 p.

48. Haken H. *Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 251 p.

49. Zakovorotny V.L., Gvinjiliya V.E. Vliyanie fluktuatsii na ustoichivost' formobrazuyushchikh traektorii pri tochenii [The influence of fluctuation on the shape-generating trajectories stability with a turning]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2017, vol. 2 (194), pp. 52–61. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-52-61.

50. Zakovorotny V.L., Gubanov A.A., Lukyanov A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevyimi frezami [Attracting sets when milling with end mills]. *STIN = Machines and Tooling*, 2016, no. 8, pp. 27–33.

51. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.T. Matematicheskoe modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya dinamicheskikh svoistv podsistem instrumenta i zagotovki pri tochenii [Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of the subsystems of the cutting tool and workpiece in the turning]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2011, vol. 2 (160), pp. 38–46.

52. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.T., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz') [Modeling of the dynamic connection formed by the turning process in problems of cutting process dynamics (speed connection)]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 2 (53), pp. 137–146.

53. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.T., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (pozitsionnaya svyaz') [Modeling of the dynamic connection formed by the turning process in problems of cutting process dynamics (positional connection)]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования

Сергей Васильев^{a, *}, Виктор Алексеев^b, Михаил Васильев^c, Алена Федорова^d

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>,  vsa_21@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>,  av77@list.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-7275-9751>,  mishawasilev@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>,  e_a_a@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.1.08

История статьи:

Поступила: 12 сентября 2020
 Рецензирование: 19 сентября 2020
 Принята к печати: 01 октября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Профилограф
 Измерение отклонения
 Форма поверхности
 Спиралевидное сканирование
 Лазерный метод
 Изделие
 Гофрированный профиль

Финансирование:

Результаты были получены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-1198.2020.8, соглашение № 075-15-2020-228.

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы разработки профилографа и реализации с его помощью измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования. Обзор научной литературы показывает, что в настоящее время вопрос контроля и оценки отклонений формы поверхности изделий требует дальнейших исследований, поскольку применение известных приборов и методов не всегда обеспечивает необходимую точность, технологичность и достаточную информативность измерений. **Цель работы:** разработка нового метода оценки трехмерного профиля путем реализации метода лазерного спиралевидного сканирования и исследование профилографа для повышения точности и производительности измерения отклонений формы поверхности изделия. **Методы.** В работе предложен новый метод оценки трехмерного профиля поверхности, чтобы непосредственно установить форму поверхности изделий для контроля качества поверхности изделий вне зависимости от ее расположения. Для реализации метода разработан и исследован профилограф оригинальной конструкции, обеспечивающий измерение двух параметров по спирали Архимеда. Выполнена оптимизация конструкции и метода представления информации для измерения отклонений формы поверхности изделий. **Результаты и обсуждение.** Предложена методика статистической оценки уравнений для описания формы металлических поверхностей, основанная на использовании классических законов. В случае гофрированной поверхности реализована оценка отклонений от плоскостности, установлена возможность определения отклонений формы поверхности изделий: волнистости, выпуклости, вогнутости и др. Апробация работы автоматизированного мехатронного устройства и предложенной методики проведена на гофрированных поверхностях. Полученные в результате статистической обработки различные уравнения сравнивались между собой, и выбиралось уравнение с наибольшим коэффициентом детерминации. Исследована профилограмма в виде развертки в декартовых координатах с целью получения достоверных и точных данных для оценки отклонений формы. Методом лазерного спиралевидного сканирования установлены величины прогиба и размер гофр по высоте гофрированного листа С-9.

Для цитирования: Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования / С.А. Васильев, В.В. Алексеев, М.А. Васильев, А.А. Федорова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 71–81. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81.

Введение

За последние десятилетия существенно повысились производительность труда и качество выпускаемой продукции. В производственном процессе контроль качества изделий является важным этапом. Одним из перспективных на-

правлений повышения уровня технологичности и производительности измерительного оборудования является создание приборов с оптимальными профилограммами и возможностями представления наглядной и точной информации об исследуемом объекте. В условиях увеличения производительности технологических линий в машиностроении при соблюдении высокой точности поверхностей изделий предъявляются существенные требования к точности и удобству эксплуатации устройств и методов для измерения отклонений формы поверхностей.

*Адрес для переписки

Васильев Сергей Анатольевич, д.т.н., доцент
 Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
 пр. Московский, 15,
 428015, г. Чебоксары, Россия
 Тел. +7 (927) 843-22-90, e-mail: vsa_21@mail.ru

Существует несколько методов проверки качества изделий, одним из таких видов операций в производственном процессе является контроль качества поверхности деталей. Известно несколько методов измерения шероховатости и волнистости поверхности, например контактный тип: атомно-силовая микроскопия, стилусная профилометрия и т. д. [1, 2]. К бесконтактным методам относят способы, реализуемые с помощью лазерной измерительной техники, методы обработки изображений, бинарный спекл-анализ изображений и др. [3–10]. Например, такие технологические параметры, как волнистость и отклонение формы поверхности, являются ключевыми в различных отраслях экономики. Так, в работах [11, 12] учитывается волнистость и морфология металлических листов, а гребнистость и волнистость подстилающей поверхности – в сельском хозяйстве [13–15]. Известен полевой профилограф С.А. Васильева, сканирующий исследуемую поверхность по окружности и измеряющий одновременно два параметра – угол поворота и расстояние до поверхности [16–18].

В настоящее время существует множество методик установления геометрических форм поверхностей и их отклонений [19–22], однако большинство из них являются либо медленными, способными работать только в лабораторных условиях, либо способными оценить лишь определенные параметры волнистости и позволяющими проводить измерения только в одной плоскости. Как правило, оборудование контактного типа, например стилусный профилометр, имеет невысокую производительность при измерениях по сравнению с бесконтактными [3]. У лазерной техники тоже есть недостатки, которые требуют определенных условий и пространства, свободного от вибраций, пыли и тепла [23]. Многие устройства не имеют автоматизации измерений, особенно устройства, представленные в ГОСТ. Поэтому разработка и исследование универсального портативного устройства, позволяющего измерять трехмерную волнистую поверхность в автоматизированном режиме, является актуальной задачей.

Традиционная проверка качества изделия производится путем отбора одного образца из партии, чтобы обеспечить качество конкретной партии. Такой метод проверки качества может привести к отбраковке всей партии или даже

приемке дефектных деталей. Для того чтобы обеспечить качество изделия, в современном цифровом мире каждый компонент должен пройти проверку качества, что повышает необходимость контроля в процессе производства. Контроль формы поверхности в процессе производства может обеспечить высокоскоростную проверку качества, снизить затраты квалифицированной рабочей силы и тем самым повысить производительность труда в современных производственных условиях [24, 25].

Отклонение формы реального профиля от формы номинального профиля называется отклонением формы. Для измерения отклонений формы изделий используют различные универсальные измерительные приборы, которые прошли государственные приемочные испытания. Можно использовать другие средства измерительных приборов, которые не выпускаются серийно, но прошли соответствующую аттестацию согласно ГОСТ 26877–2008 «Металлопродукция. Методы измерений отклонений формы».

К универсальным средствам измерения отклонений формы относятся поверочные линейки, поверочные и разметочные плиты, различных типов угольники 90°, линейки синусные со столиком, угломеры механические, уровни для контроля горизонтального и вертикального размещения поверхности.

К основным видам отклонений формы металлопродукции согласно ГОСТ 26877–2008 относят:

- отклонение от плоскостности и прямолинейности на длине 1 м;
- волнистость в поперечном сечении;
- прогиб в поперечном сечении;
- коробоватость в поперечном сечении;
- скручивание на нормируемом расстоянии от базового поперечного сечения в любой плоскости;
- разнотолщинность изделия или его элементов;
- выпуклость и вогнутость в поперечном сечении;
- кривизну (серповидность) поверхности изделия;
- перекося полок изделия;
- отклонение от величины заданного угла изделия;
- косину реза торца изделия.

Отмеченные виды отклонений формы металлопродукции довольно сложно одновременно замерить и рассчитать существующими методами. Приходится подбирать соответствующие средства измерительной техники под каждый вид или небольшую группу отклонений формы, что в промышленных масштабах создает определенную проблему.

С учетом вышесказанного сформулируем **цель исследований**: разработка нового метода оценки трехмерного профиля путем реализации метода лазерного спиралевидного сканирования и исследование профилографа для повышения точности и производительности измерения отклонений формы поверхности изделия.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) на основе обзора методов и средств измерительной техники предложить подход и конструкцию профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий;

2) изготовить конструкцию профилографа и провести исследования его работы при получении и обработке информации о профиле поверхности изделий в 2D и 3D;

3) проанализировать профилограмму на возможность получения максимального количества видов отклонений формы для экспериментального образца и установить качество регрессионной модели через коэффициент детерминации.

Методика исследований

В качестве объекта исследования предлагается автоматизированное мехатронное устройство – профилограф для спирального сканирования поверхностей изделий (рис. 1). Разрабатываемый прибор предназначен для измерения отклонений формы и профиля поверхности металлопродукции, а также определения в измеренных профилях различных геометрических показателей и морфологических параметров поверхностей. Он может использоваться в машиностроении, электротехнике, в производстве листовых изделий, для измерения деталей сложной формы.

Профилограф для спирального сканирования содержит основание с различными адаптерами. На него установлена неподвижная ось, в ее верхней части размещены энкодер, водило и два

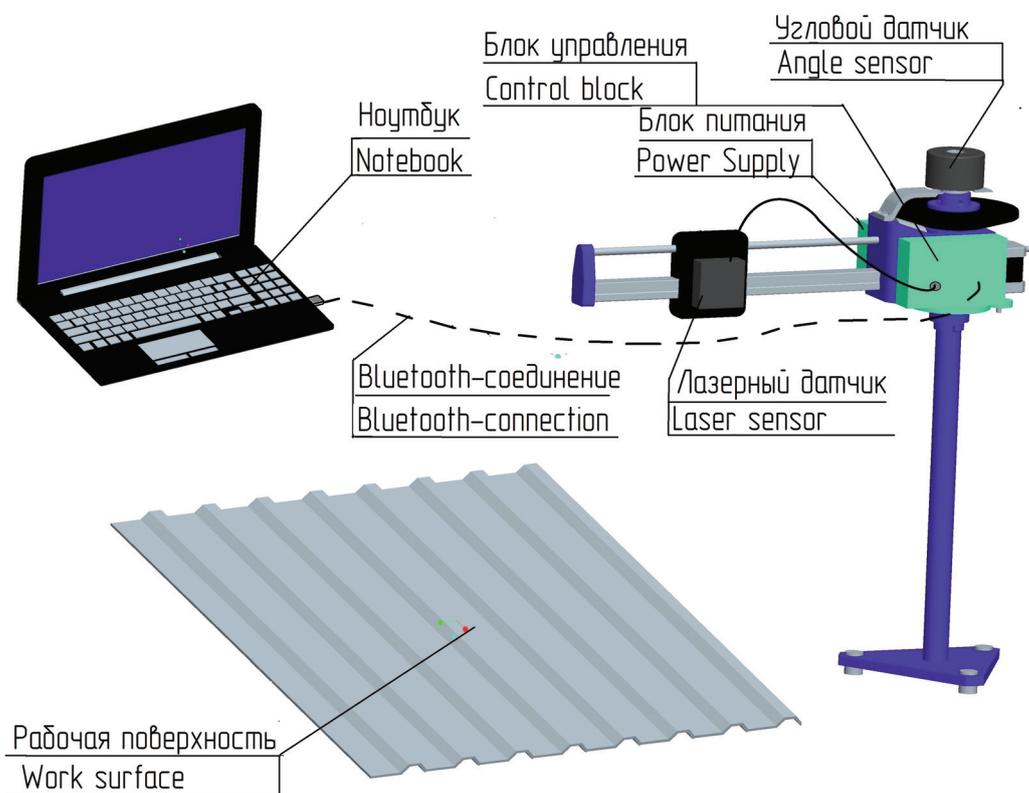


Рис. 1. Общий вид профилографа

Fig. 1. General view of the Profile recorder

опорных колеса – коническое и цилиндрическое, при обкатке по которым сателлитами и происходит вращение водила. На водиле установлена направляющая, где движется каретка с лазерным датчиком, движение которой в радиальном направлении передается винтовым механизмом. Перемещение каретки и вращение водила задается двигателем, установленным на водиле и передающим крутящий момент через цилиндрическую и коническую планетарные передачи для перемещения каретки и вращения подвижного плеча. На водиле также размещен электронный блок, который обрабатывает сигналы и подает питание, он соединен кабелями с датчиками, а также с ноутбуком посредством Bluetooth. В верхней части прибора установлен уровень.

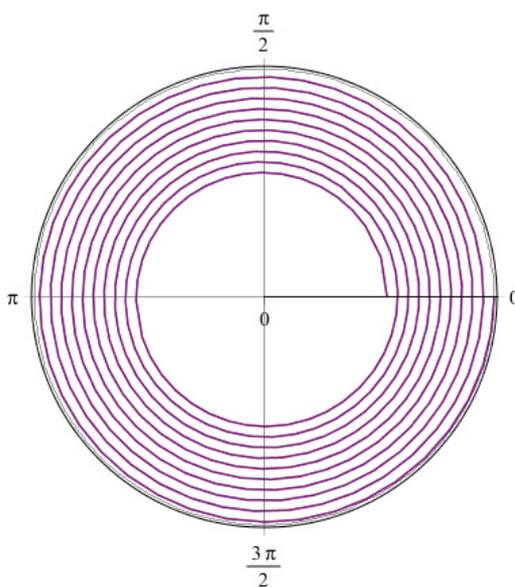
Принцип действия прибора основан на работе триангуляционного лазерного датчика, который вращается и сканирует исследуемую поверхность по спирали Архимеда (рис. 2).

Вначале профилограф размещается вертикально с помощью уровня вращением водила по окружности. Далее, используя беспроводную связь, соединяем компьютер и профилограф: включаем электрическое питание установки, вставляем Bluetooth-модуль в USB-порт на компьютере и ждем, пока частота мигания светодиода

достигнет одного раза в секунду. Запускаем компьютерную программу, и двигатель начнет передавать движение водилу при обкатке сателлитом опорного колеса. Водило передает движение сателлиту, обкатываемому по опорному колесу и жестко закрепленному с винтом, который в свою очередь передает поступательное движение в радиальном направлении каретке. За один оборот водила каретка перемещается на радиальный шаг, значение которого зависит от шага винта и передаточного отношения конической передачи. При вращении лазерный датчик измеряет расстояние до поверхности замерыемого объекта h и мгновенные значения угла поворота датчика γ , которые после обработки в электронном блоке сигналов передаются на ноутбук.

Изучение форм некоторых поверхностей можно проводить путем анализа коэффициентов описывающего его уравнения. В общем случае это может быть уравнение n -й степени. Однако в большинстве случаев можно ограничиться уравнениями 2-й и 3-й степени.

Статистическая обработка реальных данных, получаемых от датчика расстояния, производится с целью построения и анализа регрессионно-корреляционных моделей поверхности металла. Выбирается модель $z = f(x, y)$, описывающая по-



а



б

Рис. 2. Траектория движения датчика по спирали:

а – схема перемещения (вид сверху); б – общий вид

Fig. 2. The trajectory of the sensor in a spiral:

а – movement diagram (top view); б – general view

верхность. Затем производится оценка ее параметров и проверка модели на адекватность.

Рассмотрим уравнение поверхности второго порядка, которое представляет собой геометрическое место точек в трехмерном пространстве:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{13}xz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (1)$$

где по крайней мере один из коэффициентов a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{12} , a_{23} , a_{13} отличен от нуля, т. е. значим. При рассмотрении плоскости все коэффициенты a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{12} , a_{23} , a_{13} равны нулю – незначимы (аналогично с уравнениями 3-й степени).

Коэффициенты получают оценку и проходят проверку на статистическую значимость при обработке массива экспериментальных данных, полученных от датчика расстояния. Для получения коэффициентов можно использовать как готовые электронные таблицы (MS Excel, Libre Office и т. п.), так и самостоятельно разработанные программные продукты, реализующие известные формулы математической статистики. Данные для статистической обработки поступают в компьютер с шины датчика расстояния. Они представляют собой массив данных, полученных путем сканирования исследуемой поверхности по спирали (см. рис. 2). Затем при необходимости осуществляется перерасчет для перевода данных в декартову систему координат. В зависимости от конкретной ситуации выбирается направление полярной оси и «привязывается» к оси абсцисс. После этого данные разбиваются на блоки, отвечающие ячейкам декартовой системы в зависимости от интересующего случая и, следовательно, соответствующего линейного размера ячейки $\Delta x_i \Delta y_j$.

Датчик расстояния имеет достаточно высокую частоту передачи экспериментальных данных, и поэтому их число пропорционально длине кривой, пересекающей ту или иную ячейку. Поскольку эти длины разные, то и количество экспериментальных пар данных для каждой ячейки различно. Согласно математической статистике это может привести к искажению итоговых оценок уравнения (1) и статистическим ошибкам первого и второго рода. Поэтому данные внутри каждой ячейки усредняются, и оставляется

только одно среднее значение $z_{cp} = (\sum z_k) / n$, соответствующее координатам середины данной ячейки. Это необходимо для того, чтобы у каждой ячейки был одинаковый «вес» при статистическом оценивании коэффициентов уравнения.

Оценка отклонения от заданных форм. В случае, когда априори известна форма металлической поверхности и необходимо проверить ее соответствие реальным данным, логично использовать критерий согласия Пирсона χ^2

$$\chi^2 = \sum \frac{(z_0 - z_t)^2}{z_t}, \quad (2)$$

где z_0 – фактическое значение; z_t – ожидаемые значения, рассчитываются по формуле (1) после оценки коэффициентов.

В случае, когда форма поверхности заранее не известна, составляется несколько моделей поверхности. Для них рассчитываются коэффициенты детерминации R^2 и сравниваются, поскольку чем ближе значение R^2 к единице, тем в большей мере уравнение отвечает статданным.

В случае плоской поверхности уравнение (1) принимает вид

$$2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (3)$$

или общеизвестное

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (4)$$

Тогда можно изучить отклонения от прямолинейности. Для этого следует оценить отклонения всех экспериментальных значений от рассчитанных по уравнению (4) и выбрать среди них максимальное:

$$d = \max \left\{ \left| Ax_i + By_i + Cz_i + D \right|, \left(Ax + By \right) \frac{1}{2} \right\} = 0. \quad (5)$$

Аналогичный подход возможен для оценки прогиба, выпуклости и вогнутости.

Волнистость определяется как длина волны и высота неровностей. При выборе полярной оси вдоль или поперек волн и переходе к декартовой системе координат можно рассмотреть срезы развертки волн вдоль одной из осей. При этом можно проводить усреднения параметров волны при изменении координаты как вдоль перпенди-

кулярной оси, так и оси, направленной под задаваемым углом.

Коробоватость оценивается не только по величине наибольшего отклонения от плоскости (5), но и по площади прогнутой части. Она может быть определена построением контура-границы между плоской и прогнутой частью согласно условию

$$z_1 = z_2. \quad (6)$$

Скручивание выражается в миллиметрах или градусах на нормируемую длину. Если величина отклонения измеряется как в предыдущих случаях, то угол скручивания можно измерить по изменению угла нормали поверхности на нормируемую длину.

Результаты и их обсуждение

В случае гофрированной поверхности основные механизмы измерений остаются неизменными, однако производится поправка на периодичность и высоту гофр и т. п. В данном случае при относительно постоянных характеристиках складок на поверхности металла (высота, ширина и пр.) удобнее рассматривать аддитивную модель, в которой экспериментально полученные значения представлены как суммы:

$$z_t = T + S + E, \quad (7)$$

где T – компонента, формирующая общую форму поверхности (без гофр); S – периодически меняющаяся компонента, путем трансляции с некоторым периодом формирующая сами складки (гофры); E – случайная составляющая.

Если же характеристики складок начинают существенно меняться при перемещении по изучаемой поверхности, то правильнее использовать мультипликативную модель:

$$Y = TSE. \quad (8)$$

Статистическая обработка позволяет получить закономерность для каждой компоненты. Изучая на максимум тесноту связи $r(\tau)$ между последовательностями сдвинутых относительно друг друга на τ единиц данных $z_1, z_2, \dots, z_{n-\tau}$ и $z_{1+\tau}, z_{2+\tau}, \dots, z_n$, определяют те значения τ , которые связаны с периодичностью следования складок-гофр. Это позволяет

разделить общий массив данных и по отдельности изучать как саму базовую поверхность, так и строение складок, а также их эволюцию по мере изменения координат вдоль какой либо оси.

Процесс построения модели поверхности состоит из выравнивания экспериментальных данных методом скользящей средней, расчета числовых характеристик T - и S -компонент и составления итоговой модели. После этого возможно рассчитать абсолютные отклонения модельных значений от экспериментальных. При наличии альтернативных моделей поверхности анализ абсолютных ошибок методами математической статистики позволяет сделать обоснованный выбор в пользу той или иной модели.

Наиболее подходящие варианты моделей прогиба гофрированного листа в поперечном сечении: эллиптический цилиндр

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

или гиперболический цилиндр

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1. \quad (10)$$

После статистической обработки данных прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вверх получаем эмпирическую формулу гиперболического цилиндра с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,946$ (рис. 3):

$$y^2 - 38,39z^2 + 2 \cdot 2184,82z - 122\,501,02 = 0. \quad (11)$$

Предполагаемая форма поверхности прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вниз будет иметь вид гиперболического параболоида, описываемого формулой

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2z. \quad (12)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных подтверждает это предположение по эмпирической формуле с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,962$ (рис. 4):

$$0,0002041x^2 + 0,0008163y^2 + 9,8946621 = 2z. \quad (13)$$

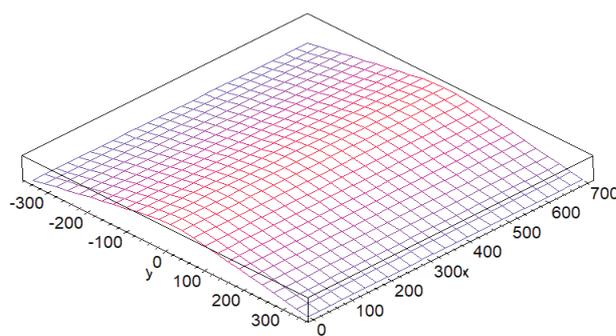
*a**б*

Рис. 3. Прогиб гофрированного листа в поперечном сечении вверх:

a – объект исследования; *б* – поверхность отклика

Fig. 3. Deflection of the corrugated sheet in the cross section upward:

a – the object of study; *б* – the response surface

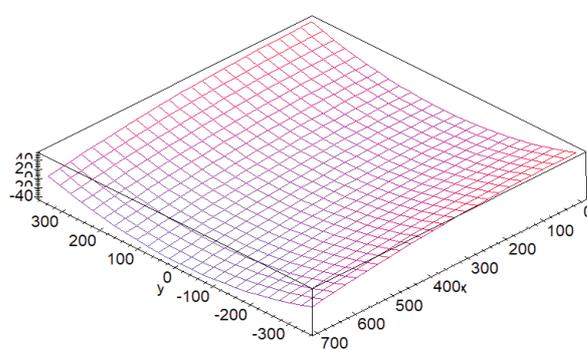
*a**б*

Рис. 4. Прогиб гофрированного листа в поперечном сечении вниз:

a – объект исследования; *б* – поверхность отклика

Fig. 4. Deflection of the corrugated sheet in the cross section downward:

a – the object of study; *б* – the response surface

Полученные данные о профиле поверхности гофрированного листа по спирали Архимеда сформировывались в табличной форме в программе MS Excel. На рис. 5 представлена информация в виде развертки для первого витка спирали при прогибе гофрированного листа в поперечном сечении вниз.

Анализ полученных данных позволил установить величины прогиба гофрированного листа в поперечном сечении вверх и вниз, которые составили 11,8 и 13,8 мм соответственно. Величина гофр по высоте гофрированного листа С-9 составила 8,9 мм, что допустимо по требованиям контроля качества изделия (см. рис. 2, б).

Таким образом, в процессе исследования разработанного профилографа установлена воз-

можность измерить и определить отклонения формы поверхности изделий, используя метод лазерного спиралевидного сканирования.

Выводы

1. Разработан новый метод оценки трехмерного профиля путем реализации метода лазерного спиралевидного сканирования и проведено исследование профилографа для повышения точности и производительности измерения отклонений формы поверхности изделия.

2. В процессе исследования предложена методика статистической оценки уравнений для описания формы металлических поверхностей, основанная на использовании классических законов. Полученные в результате статистической

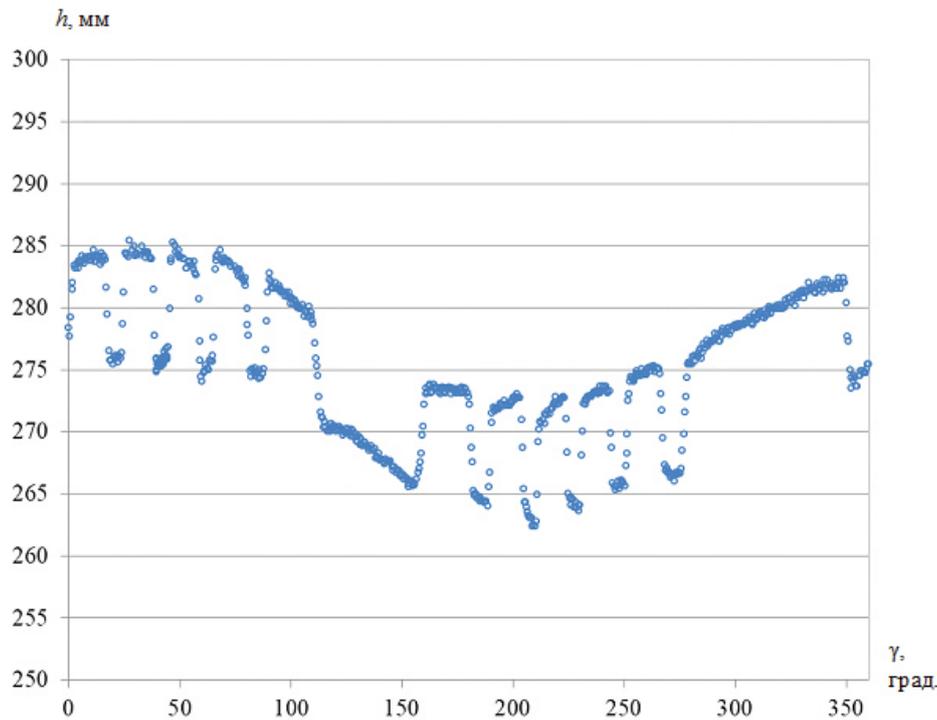


Рис. 5. Профиль поверхности гофрированного листа по первому витку спирали Архимеда

Fig. 5. Profile of the corrugated sheet surface along the first turn of the Archimedean spiral

обработки различные уравнения сравнивались между собой, и выбиралось уравнение с наибольшим коэффициентом детерминации в пределах 6 %.

3. Апробация работы автоматизированного устройства и предложенной методики проведения на гофрированных поверхностях металлопродукции. В случае гофрированной поверхности реализована оценка отклонений от плоскостности, установлена возможность определения отклонения форм поверхности изделий: волнистости, коробоватости, скручивания, выпуклости, вогнутости, кривизны и др.

4. Методом лазерного спиралевидного сканирования установлены величины прогиба гофрированного листа С-9 в поперечном сечении вверх и вниз, которые составили 11,8 и 13,8 мм соответственно, а размер гофр по высоте составил 8,9 мм.

Список литературы

1. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing // Measurement. – 2013. – Vol. 46, iss. 7. – P. 2065–2072. – DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.
2. Lushnikov N., Lushnikov P. Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 20, pp. 425–429. – DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.
3. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser / V.V. Alexander, H. Deng, M.N. Islam, F.L. Terry // Conference on Lasers and Electro-Optics. – San Jose, 2010. – DOI: 10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3.
4. Babu R.A., Baldev R.A. Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques // Sadhana. – 2003. – Vol. 28, pt. 3–4. – P. 739–761. – DOI: 10.1007/BF02706457.
5. Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N. Portable non-contact surface roughness measuring device // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 469. – P. 012074. – DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
6. Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S. Vision system in quality control automation // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 144. – P. 03008. – DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
7. Shih F.Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. – Hoboken, NJ: Wiley, 2010. – 537 p. – ISBN 978-0-470-40461-4.



8. Lee B.Y., Tarng Y.S. Surface roughness inspection by computer vision in turning operations // *International Journal of Machine tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41. – P. 1251–1263. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00023-2.
9. Spagnoloa G.S., Cozzellaa L., Lecceseb F. Viability of an optoelectronic system for real time roughness // *Measurement*. – 2014. – Vol. 58. – P. 537–543.
10. Measurement of surface roughness of metal using binary speckle image analysis / E. Kayahana, H. Oktemb, F. Hacizadeb, H. Nasibovb // *Tribology International*. – 2010. – Vol. 43. – P. 307–311. – DOI: 10.1016/j.triboint.2009.06.010.
11. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (1). – P. 19. – DOI: 10.3390/jmmp3010019.
12. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53 (16). – P. 4293–4304. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
13. Васильев С.А., Максимов И.И., Алексеев В.В. Методика и устройство для профилирования поверхности почвы и определения направления стока атмосферных осадков в полевых условиях // *Вестник АПК Ставрополя*. – 2015. – № 3. – С. 22–26.
14. Васильев С.А., Алексеев В.В., Речнов А.В. Экспресс-метод количественной оценки пожнивных остатков на поверхности почвы // *Аграрный научный журнал*. – 2015. – № 9. – С. 11–13.
15. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (2). – P. 40. – DOI: 10.3390/jmmp3020040.
16. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer // *Engineering for Rural Development. Proceedings*. – 2018. – Vol. 17. – P. 537–542.
17. Васильев С.А. Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2016. – № 3. – С. 220–226.
18. Васильев С.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2016. – № 4. – С. 40–54.
19. Image-based inspection technique of a machined metal surface for an unmanned lapping process / D. Ravimal, H. Kim, D. Koh, J.H. Hong, S.K. Lee // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. – 2019. – DOI: 10.1007/s40684-019-00181-7.
20. Application of laser profilometry to evaluation of the surface of the workpiece machined by abrasive water jet technology / G. Mital, J. Dobránský, J. Ružbárský, Š. Olejárová // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – P. 21–34. – DOI: 10.3390/app9102134.
21. Liu C.-Y., Tzu-Ping Y. Digital multi-step phase-shifting profilometry for three-dimensional ballscrew surface imaging // *Optics and Laser Technology*. – 2015. – Vol. 79. – P. 115–123. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.12.001.
22. Bračun D., Perdan B., Diaci J. Surface defect detection on power transmission belts using laser profilometry // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 57 (3). – P. 257–266. – DOI: 10.5545/sv-jme.2010.176.
23. Campana C., Moslehpour S. Non contact surface roughness measurement instrumentation // *American Society for Engineering Education*. – 2007. – AC 2007-2557. – P. 12.1107.
24. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts / P. Groche, A. Zettler, S. Berner, G. Schneider // *International Journal of Material Forming*. – 2010. – Vol. 4 (4). – DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
25. Schilling R.J. Fundamentals of robotics: analysis and control. – New Delhi: Prentice Hall, 2005. – ISBN 81-203-1047-0.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Development and Research of a Profile Recorder for Measuring Deviations in the Shape of the Surface of Products by Laser Spiral Scanning

Sergey Vasiliev ^{a, *}, Viktor Alekseev ^b, Mikhail Vasiliev ^c, Alyona Fedorova ^d

I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>, vsa_21@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, av77@list.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7275-9751>, mishawasiliev@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>, e_a_a@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 September 2020

Revised: 19 September 2020

Accepted: 01 October 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Profile recorder

Deviation measurement

Surface shape

Spiral scanning

Laser method

Product

Corrugated profile

Funding

The results were obtained under the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MD-1198.2020.8, agreement No. 075-15-2020-228.

ABSTRACT

Introduction. The paper deals with the development of a Profile recorder and measurement of deviations in the shape of the surface of products by laser spiral scanning. Analysis of the scientific literature shows that at present, the issues of monitoring and evaluating deviations in the shape of the surface of products require further research, since the use of well-known devices and methods does not always provide the necessary accuracy, manufacturability and sufficient information content of measurements. The research urgency is caused by the fact that existing methods of measuring form deviations of the surfaces does not allow to define a set of parameters with the required accuracy and submit it to two-dimensional and three-dimensional form. **Objective:** to develop a new method for evaluating a three-dimensional profile by implementing the method of laser spiral scanning and study the Profile recorder to improve the accuracy and productivity of measuring deviations in the shape of the product surface. **Methods.** The paper proposes a new method for evaluating a three-dimensional surface profile in order to directly determine the shape of the surface of products, to control the quality of the surface of products, regardless of its location. To implement the method, a Profile recorder of an original design is developed and investigated, which provides measurement of two parameters along the Archimedean spiral. Optimization of the design and the method of presenting information for measuring deviations in the shape of the surface of products are performed. **Results and discussion.** A method of statistical estimation of equations for describing the shape of metal surfaces based on the use of classical laws is proposed. In the case of a flat surface, deviations from flatness are evaluated: undulation, warping, twisting, convexity, concavity, curvature, etc. A Profile recorder is developed to implement the proposed method. The automated mechatronic device and the proposed method are tested on corrugated surfaces. Various equations obtained as a result of statistical processing were compared with each other, and the equation with the highest coefficient of determination is selected. The Profile recorder in Cartesian coordinates is studied in order to obtain reliable and accurate data for estimating shape deviations. The values of the deflection and the size of the corrugation along the height of the C-9 corrugated sheet are determined by laser spiral scanning.

For citation: Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Vasiliev M.A., Fedorova A.A. Development and research of a profile recorder for measuring deviations in the shape of the surface of products by laser spiral scanning. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 71–81. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81. (In Russian).

References

1. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing. *Measurement*, 2013, vol. 46, iss. 7, pp. 2065–2072. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.
2. Lushnikov N., Lushnikov P. Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer. *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 20, pp. 425–429. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.
3. Alexander V.V., Deng H., Islam M.N., Terry F.L. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, 2010. DOI: 10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3.
4. Babu R.A., Baldev R.A. Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques. *Sadhana*, 2003, vol. 28, pt. 3–4, pp. 739–761. DOI: 10.1007/BF02706457.

* Corresponding author

Vasiliev Sergey A., D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
 I.N. Ulianov Chuvash State University,
 15 Moskovsky Prospekt,
 428015, Cheboksary, Russia
 Tel.: +7 (927) 843-22-90, e-mail: vsa_21@mail.ru



5. Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N. Portable non-contact surface roughness measuring device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, p. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
6. Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S. Vision system in quality control automation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144, p. 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
7. Shih F.Y. *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*. Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 537 p. ISBN 978-0-470-40461-4.
8. Lee B.Y., Tarng Y.S. Surface roughness inspection by computer vision in turning operations. *International Journal of Machine tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, pp. 1251–1263. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00023-2.
9. Spagnolo G.S., Cozzellaa L., Lecceseb F. Viability of an optoelectronic system for real time roughness. *Measurement*, 2014, vol. 58, pp. 537–543.
10. Kayahana E., Oktemb H., Hacizadeb F., Nasibovb H. Measurement of surface roughness of metal using binary speckle image analysis. *Tribology International*, 2010, vol. 43, pp. 307–311. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.06.010.
11. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (1), p. 19. DOI: 10.3390/jmmp3010019.
12. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53 (16), pp. 4293–4304. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
13. Vasiliev S.A., Maksimov I.I., Alekseev V.V. Metodika i ustroistvo dlya profilirovaniya poverkhnosti pochvy i opredeleniya napravleniya stoka atmosferykh osadkov v polevykh usloviyakh [Method and apparatus for profiling the surface of the soil and determine the direction of runoff to precipitation field]. *Vestnik APK Stavropol'ya = Agricultural Bulletin of Stavropol Region*, 2015, no 3, pp. 22–26.
14. Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Rechnov A.V. Ekspres-metod kolichestvennoi otsenki pozhnivnykh ostatkov na poverkhnosti pochvy [Express-method of quantitative assessment of crop residues on the soil surface]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2015, no. 9, pp. 11–13.
15. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (2), p. 40. DOI: 10.3390/jmmp3020040.
16. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer. *Engineering for Rural Development. Proceedings*, 2018, vol. 17, pp. 537–542.
17. Vasiliev S.A. Razrabotka metoda i profilografa dlya otsenki meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Development of a method and the profilometer to control reclamation technologies slope agrolandscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*, 2016, no. 3, pp. 220–226.
18. Vasiliev S.A. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov profilografov dlya kontrolya meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Justification of structural and technological parameters of profilographs for reclamation technologies control on sloping cultivated lands]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*, 2016, no. 4, pp. 40–54.
19. Ravimal D., Kim H., Koh D., Hong J.H., Lee S.K. Image-based inspection technique of a machined metal surface for an unmanned lapping process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2019. DOI: 10.1007/s40684-019-00181-7.
20. Mital G., Dobránský J., Ružbarský J., Olejárová Š. Application of laser profilometry to evaluation of the surface of the workpiece machined by abrasive water jet technology. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, pp. 21–34. DOI: 10.3390/app9102134.
21. Liu C.-Y., Tzu-Ping Y. Digital multi-step phase-shifting profilometry for three-dimensional ballscrew surface imaging. *Optics and Laser Technology*, 2015, vol. 79, pp. 115–123. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.12.001.
22. Bračun D., Perdan B., Diaci J. Surface defect detection on power transmission belts using laser profilometry. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, vol. 57 (3), pp. 257–266. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.176.
23. Campana C., Moslehpour S. Non contact surface roughness measurement instrumentation. *American Society for Engineering Education*, 2007, AC 2007-2557, p. 12.1107.
24. Groche P., Zettler A., Berner S., Schneider G. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 4 (4). DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
25. Schilling R.J. *Fundamentals of robotics, analysis and control*. New Delhi, Prentice Hall, 2005. ISBN 81-203-1047-0.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Обоснование расходных характеристик рекуператора для тепловой подготовки агрегатов машин и оборудования

Роман Чернухин^{1, а, *}, Алексей Долгушин^{2, б}, Николай Касимов^{3, с}, Владимир Иванцовский^{1, д},
 Дмитрий Лобанов^{4, е}, Сергей Васильев^{4, ф}, Никита Мартюшев^{5, г}

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

² Новосибирский государственный аграрный университет, ул. Добролюбова, 160, г. Новосибирск, 630039, Россия

³ Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Студенческая, 11, г. Ижевск, 426069, Россия

⁴ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, 428015, Россия

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-1324-0161>, chernuxin@corp.nstu.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-7506-6309>, dolgushin078@mail.ru,

^с <https://orcid.org/0000-0001-9009-0836>, nikolakas@list.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru,

^е <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru, ^ф <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>, vsa_21@mail.ru,

^г <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martjushev@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 62.7

История статьи:

Поступила: 18 сентября 2020
 Рецензирование: 05 октября 2020
 Принята к печати: 07 ноября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Моделирование
 Рекуператор
 Тепловые процессы
 Тепловая подготовка

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_20.

Благодарности:

Исследования выполнены в ЦКП ССМ НГТУ.

АННОТАЦИЯ

Введение. Машины и оборудование в своем составе могут содержать гидравлические системы для обеспечения функционирования основных и вспомогательных систем. Известно, что общим недостатком гидравлических систем и приводов является зависимость вязкости применяемых жидкостей от температуры. Заметная часть технологических машин и оборудования размещается в неотопляемых или плохо отопляемых производственных помещениях, и изменение вязкости рабочих жидкостей при понижении температуры внешней среды может существенно влиять на параметры технологических процессов. Важным фактором обеспечения стабильности параметров технологических процессов является степень подготовки машин и оборудования к работе в условиях низких температур или в условиях колебаний температурного режима. В связи с этим встает вопрос обеспечения необходимой температуры технических жидкостей перед включением машин и оборудования и поддержания необходимого теплового режима в процессе работы их узлов и агрегатов. Один из способов решения данной задачи заключается в применении внешних источников тепла. Такими источниками могут служить различные теплообменные устройства. В теплообменном устройстве осуществляется нагрев теплоносителя, который затем подается в теплообменную рубашку агрегатов машин и оборудования. Для нагрева теплоносителя в теплообменнике применяются как жидкие, так и газообразные среды. В последнем случае теплообменник называют рекуператором. Эффективность работы рекуператора определяется его конструктивными и расходными характеристиками. Существуют методики аналитического определения как конструктивных, так и расходных характеристик рекуператора, однако эти методы обладают достаточно большой трудоемкостью. Применение компьютерного моделирования тепловых процессов позволяет успешно решать задачу расчета, а также существенно сокращает время проектирования теплообменных аппаратов. **Целью работы** является обоснование расходных характеристик рекуператора для поддержания теплового режима посредством компьютерного моделирования. **Методом исследования** является компьютерное моделирование тепловых процессов, которое реализуется с помощью программного комплекса SolidWorks компании Dassault Systems и его приложения Flow Simulation для моделирования тепловых процессов в научных исследованиях и инженерной деятельности. **Результаты и обсуждение.** Моделирование проводилось в стационарном и нестационарном режиме и позволило определить влияние производительности насоса на температуру теплоносителя на выходе из рекуператора. Установлено что при расходе теплоносителя более 20 л/ч его температура не достигает необходимых значений несмотря на то, что газы, выходящие из рекуператора, имеют существенную остаточную температуру. Оценка эффективности рекуператора проводилась с помощью определения эксергетического КПД. Исходя из полученных данных, наиболее предпочтительными оказались значения производительности насоса, лежащие в диапазоне от 4 до 20 л/ч.

Для цитирования: Обоснование расходных характеристик рекуператора для тепловой подготовки агрегатов машин и оборудования / Р.В. Чернухин, А.А. Долгушин, Н.Г. Касимов, В.В. Иванцовский, Д.В. Лобанов, С.А. Васильев, Н.В. Мартюшев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 82–93. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-82-93.

*Адрес для переписки

Чернухин Роман Владимирович, к.т.н.,
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-17-97, e-mail: chernuxin@corp.nstu.ru

Введение

Важной эксплуатационной характеристикой машин и оборудования является тепловой режим. От стабильности теплового режима зависит технологическая надежность машин и оборудования, в частности металлорежущих станков. Работа машин и оборудования, оснащенных гидравлическими системами и приводами, во многом зависит от температуры окружающей среды и ее стабильности. Кроме снижения эффективности неблагоприятные температурные условия могут приводить к интенсивным износам и снижению долговечности узлов и агрегатов машин и оборудования [1–6]. Это связано с изменениями вязкости рабочих жидкостей при изменении температуры окружающей среды. Несмотря на то что современные рабочие жидкости и смазочные материалы обеспечивают работоспособность машин и оборудования в широком диапазоне температур, эффективность работы оборудования при низких и высоких температурах не является одинаковой. Так, например, измерения температуры эксплуатационных жидкостей, которые проводились в агрегатах машин при отрицательных температурах, показали, что тепловой режим не является эффективным даже спустя несколько часов работы [7]. Температура масла не достигала тех значений, которые бы обеспечили минимальные потери на передачу крутящего момента в редукторах и передачах машины. Увеличение этих потерь приводит к увеличению затрат энергии и оказывает негативное влияние на долговечность работы механизмов привода. Рост числа отказов редукторов и передач при этом существенно снижает общую надежность машин, несмотря на то что доля отказов редукторов и приводов не всегда является главной причиной выхода из строя машин и оборудования. Так, доля отказов агрегатов трансмиссии автомобиля существенно ниже, чем, например, доля отказов двигателя [8].

Обеспечение теплового режима агрегатов машин и оборудования происходит в основном за счет саморазогрева рабочих жидкостей и смазочных материалов, однако этот процесс протекает крайне

медленно. Решением данной проблемы является дополнительный подвод тепла от сторонних источников энергии. В качестве такого источника можно применить теплообменные устройства.

Реализация этой идеи может осуществляться с помощью теплообменного устройства, которое представляет собой рекуператор типа «труба в трубе» (рис. 1). Внутри корпуса 1 установлены теплообменные трубки 2, по которым циркулирует теплоноситель. В корпусе имеется патрубок для подачи разогретых газов 3, патрубок отвода газов 4, патрубок для подачи 5 и отвода 6 теплоносителя. Система подачи газа и жидкости собрана по противоточной схеме, а дополнительные трубки в корпусе не препятствуют выпуску газов наружу.

Работа рекуператора осуществляется следующим образом. Разогретые газы направляются внутрь корпуса. Избыточное тепло газов передается трубкам, по которым циркулирует жидкость, причем циркуляция жидкости обеспечивается принудительно за счет отдельного насоса. Работа насоса, в свою очередь, обеспечивается от бортовой сети или другого источника. Избыточное давление теплоносителя компенсируется с помощью расширительного бака [9].

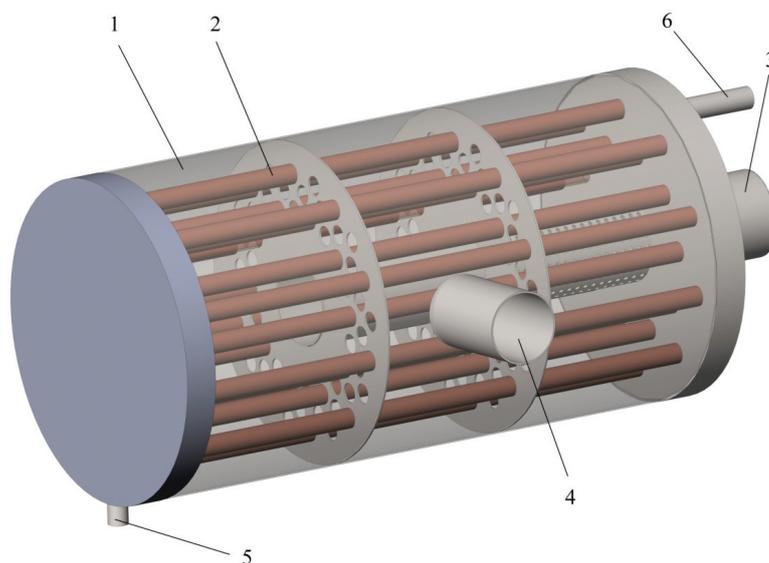


Рис. 1. Конструкция рекуператора:

1 – корпус; 2 – теплообменные трубки; 3 – впускная труба с перфорацией; 4 – выпускной патрубок; 5 – штуцер подачи теплоносителя; 6 – штуцер отвода теплоносителя

Fig. 1. The Recuperator design:

1 – housing; 2 – heat exchange tubes; 3 – perforated pipe; 4 – outlet pipe; 5 – coolant supply connector; 6 – coolant discharge connector

Эффективность рекуператора зависит от геометрических параметров его конструкции, а также от расходных характеристик подаваемых в него теплоносителя и газов. Для расчета конструктивных и расходных характеристик теплообменных устройств применяются аналитические методы, однако в последнее время одним из наиболее распространенных методов исследования стало имитационное моделирование [10].

Имитационное моделирование является мощным средством для исследования теплообменных устройств. Программный комплекс SolidWorks и его приложение Flow Simulation дает возможность при относительно небольших временных затратах проводить расчеты в стационарном и нестационарном режиме. Создаваемые модели позволяют визуально оценить тепловое поле рекуператора и при необходимости провести оптимизацию конструкции. Моделирование позволяет определить влияние расходных характеристик на температуру теплоносителя на выходе из рекуператора, что дает возможность выбрать предпочтительные значения производительности насоса.

Целью данной работы является обоснование расходных характеристик питающего насоса рекуператора посредством создания компьютерной модели рекуператора и имитационного моделирования тепловых процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) построить твердотельную модель рекуператора;
- 2) определить исходные данные и граничные условия для моделирования тепловых процессов и провести его в стационарном и нестационарном режиме;
- 3) определить температуру теплоносителя при разных значениях расходных параметров насоса теплоносителя;
- 4) провести оценку эффективности работы рекуператора.

Методика исследований

В качестве программной среды моделирования в данной работе был выбран SolidWorks Flow Simulation, широко применяемый для моделирования тепловых процессов [11–13]. В основе моделирования тепловых процессов, а

также течения жидкостей и газов лежат технологии вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics (CFD)), которые отражают функционирование реальных систем и процессов во времени [14]. Необходимо отметить, что данный математический аппарат применяется не только в SolidWorks Flow Simulation, но и в других средствах моделирования, где целью стоят расчеты теплопередачи, излучения и теплопроводности [15, 16], а приложение Flow Simulation также применяется и для решения других задач [17–20]. Основой для моделирования движения потока служит уравнение Навье – Стокса [21, 22]

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}, \quad (1)$$

где ∇ – оператор набла (векторный дифференциальный оператор, через который выражаются основные операции векторного анализа); t – время; ν – коэффициент кинематической вязкости; ρ – плотность; p – давление; $\vec{u} = (u^1, \dots, u^n)$ – векторное поле скорости; \vec{F} – векторное поле массовых сил.

Уравнение Навье – Стокса является интерпретацией законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости или газа. В SolidWorks Flow Simulation оно дополнено выражениями состояния жидкости, например эмпирическими зависимостями плотности, вязкости и теплопроводности от температуры, а также уравнениями геометрии потока.

Базовым уравнением для описания процесса теплоотдачи от газа или жидкости твердому телу является уравнение Ньютона – Рихмана

$$Q = \alpha S (T_s - T_f), \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, которое отводится от поверхности нагреваемого или охлаждаемого тела, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² · К; S – площадь поверхности, м²; $(T_s - T_f)$ – температурный напор, К.

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов: формы, размера тел, режимов движения жидкостей, их физических свойств, положения в пространстве, состояния поверхности. Величину α при конвективном теплообмене определяют по формуле

$$\alpha = \frac{\overline{Nu}_A \cdot \lambda_A}{L_S}, \quad (3)$$

где Nu_A – показатель критерия Нуссельта для воздуха; λ_A – коэффициент теплопроводности окружающего воздуха, Вт/м · К; L_S – длина поверхности, обтекаемая воздухом, м.

Традиционно эффективность теплообменных аппаратов оценивается с помощью термодинамического КПД, однако при определенных значениях расходных характеристик протекающих через теплообменник сред величина КПД принимает значения больше единицы. Кроме того, термодинамический КПД не учитывает некоторые потери тепла при взаимодействии с внешней средой. Основой энергосбережения является эксергетический анализ [23, 24]. Он дает возможность наглядно выявлять уровень совершенства процессов и источники потерь [25]. В настоящей работе эффективность оценивалась с помощью эксергетического КПД, который определяется как отношение фактически совершенной работы к ее максимальному значению и является показателем, отражающим степень совершенства термодинамического процесса.

Эксергетический КПД определяется из выражения

$$\eta = E_{ex} / E_{en}, \quad (4)$$

где E_{ex} – поток эксергии на выходе из аппарата

$$E_{ex} = G_1 \cdot e_1'' + G_2 \cdot e_2''; \quad (5)$$

E_{en} – поток эксергии на входе в аппарат

$$E_{en} = G_1 \cdot e_1' + G_2 \cdot e_2'; \quad (6)$$

G_1 и G_2 – массовые расходы теплоносителей, кг/с; e_1'' , e_2'' , e_1' и e_2' – удельные термические эксергии компонентов на выходе и входе в теплообменник соответственно, Дж/кг.

Численные значения удельных термических эксергий компонентов газовой смеси определяют из выражения

$$e_i = c_{Pi} (T_i - T_0) - T_0 \times \\ \times (c_{Pi} \ln T_i / T_0 - R_i \ln P_i / P_0), \quad (7)$$

где c_{Pi} – средняя изобарная массовая теплоемкость компонента, Дж/кг · К; T_i и T_0 – температура компонента и окружающей среды, К; P_i и P_0 – парциальное давление компонента и окружающей среды, Па; R_i – характеристическая газовая постоянная компонента, Дж/кг · К;

Удельную термическую эксергию для капельных жидкостей определяют по уравнению

$$e_i = c_{Pi} (T_i - T_0) - T_0 [c_{Pi} \ln T_i / T_0 - \\ - \beta (P_i - P_0) / \rho_i], \quad (8)$$

где β – коэффициент объемного (термического) расширения, K^{-1} ; ρ_i – плотность теплоносителя, кг/м³; $P_i - P_0 = \Delta P$ – перепад давления в теплообменном аппарате, Па.

Для построения модели в программном комплексе SolidWorks необходимы следующие исходные данные:

- геометрические размеры каждой детали, входящей в общую сборку рекуператора;
- материал, из которого изготовлена каждая отдельная деталь;
- температура газов на входе в рекуператор;
- температура теплоносителя на входе в рекуператор;
- скорость движения отработавших газов на входе;
- тип решаемой задачи (теплопроводность в твердых телах, радиационный теплообмен, нестационарность, гравитация, вращение, свободная поверхность);
- параметры текучих сред (наименование газа и жидкости, режим течения жидкости;
- материал стенок;
- температура внешней среды;
- коэффициент теплопроводности;
- шероховатость поверхностей;
- начальная температура твердых тел;
- атмосферное давление;
- объемный расход газа на выходе из рекуператора.

Средняя температура подаваемых газов была принята на уровне 373 К. Это значение достигается при частоте вращения коленчатого вала дизеля 1280...1700 об/мин. Начальная температура теплоносителя на входе в рекуператор при моделировании принималась равной 243 К. Такое же значение было принято для температуры окру-

жающей среды. В качестве теплоносителя при моделировании применялся 50%-ный раствор этиленгликоля с соответствующими характеристиками [26].

Результаты и их обсуждение

Моделирование в стационарном режиме

Стационарным режимом работы тепловых устройств считают такой режим, при котором температура в каждой точке остается неизменной и не зависит от времени. В данном режиме не учитывается, что тела имеют время нагрева и охлаждения. Несмотря на то что такой режим вряд ли можно назвать характерным для рассматриваемого рекуператора, посредством которого происходит нагрев теплоносителя, руководства по SolidWorks рекомендуют любое моделирование начинать именно со стационарного режима, а уже после, убедившись в адекватности полученных результатов, производить моделирование в режиме нестационарности. Кроме того, первоначальное моделирование в стационарном режиме позволяет быстро заметить и устранить ошибки, а также сокращает время расчета за счет меньшего потребления вычислительных ресурсов компьютера.

Внешний вид построенной модели приведен на рис. 2.

По полученным в процессе моделирования данным были построены необходимые зависимости, которые представлены на рис. 3.

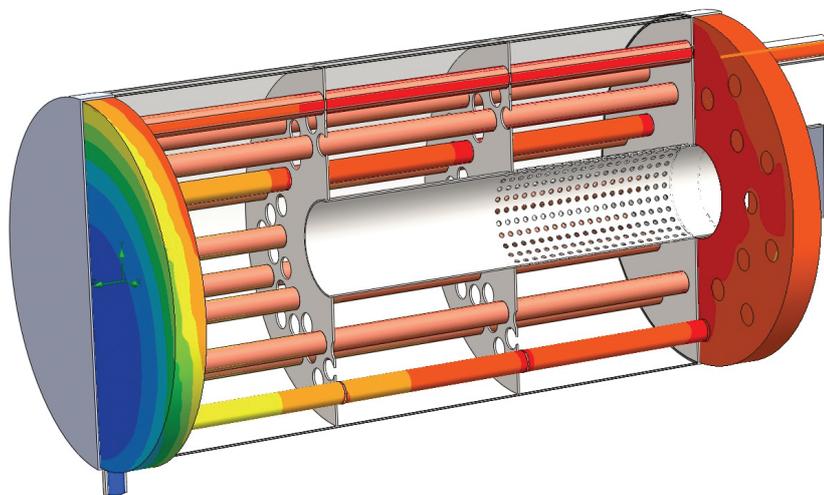


Рис. 2. Модель рекуператора в SolidWorks в разрезе

Fig. 2. The model of the recuperator

Анализ зависимостей показывает, что температура газов довольно высокая во всем рассматриваемом диапазоне и газы все еще имеют избыточную тепловую энергию. С увеличением подачи теплоносителя в рекуператор происходит плавное снижение его температуры в трубках рекуператора, поскольку увеличение скорости движения потока жидкости не позволяет ей принять тепловую энергию газов. При этом максимальная температура теплоносителя, равная 383 К, достигается при подаче теплоносителя 1 л/ч. На графике температуры теплоносителя на выходе из рекуператора отчетливо заметен участок, где имеется область максимальных значений, соответствующая диапазону от 4 до 10 л/ч. Падение температуры свыше значения производительности 10 л/ч связано с увеличением скорости движения жидкости, что соответствует кривой температуры теплоносителя в трубках рекуператора. Однако при значениях подачи менее 4 л/ч температура также падает, хотя температура теплоносителя внутри рекуператора максимальна. Этот эффект объясняется тем, что при малых подачах насоса нагретая в рекуператоре жидкость успевает охладиться, пока проходит через выходной патрубок.

Моделирование в нестационарном режиме

Как было указано ранее, стационарный тепловой режим нехарактерен для работы рассматриваемых рекуператоров и нельзя не учитывать время на разогрев и остывание. Кроме того, время выхода рекуператора на постоянный режим является важной характеристикой, которую можно получить, только проводя моделирование в нестационарном режиме.

Расчет в нестационарном режиме проводился для следующего ряда производительностей насосов: 5, 10, 20, 50, 150, 250 л/ч. Физическое время моделирования принималось равным 3600 с. Графики выхода работы рекуператора на стационарный режим представлены на рис. 4.

Из графика видно, что время выхода в стационарный режим увеличивается при уменьшении значения производительности насоса. Вместе с

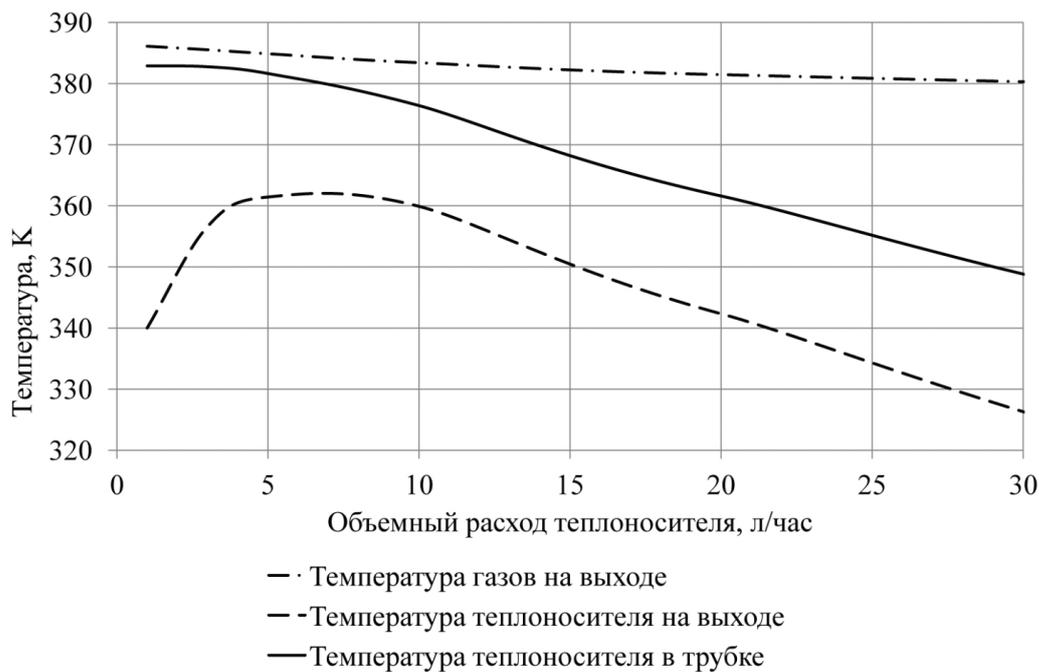


Рис. 3. График зависимости температуры теплоносителя от его расхода

Fig. 3. Diagram of coolant temperature versus coolant flow rate

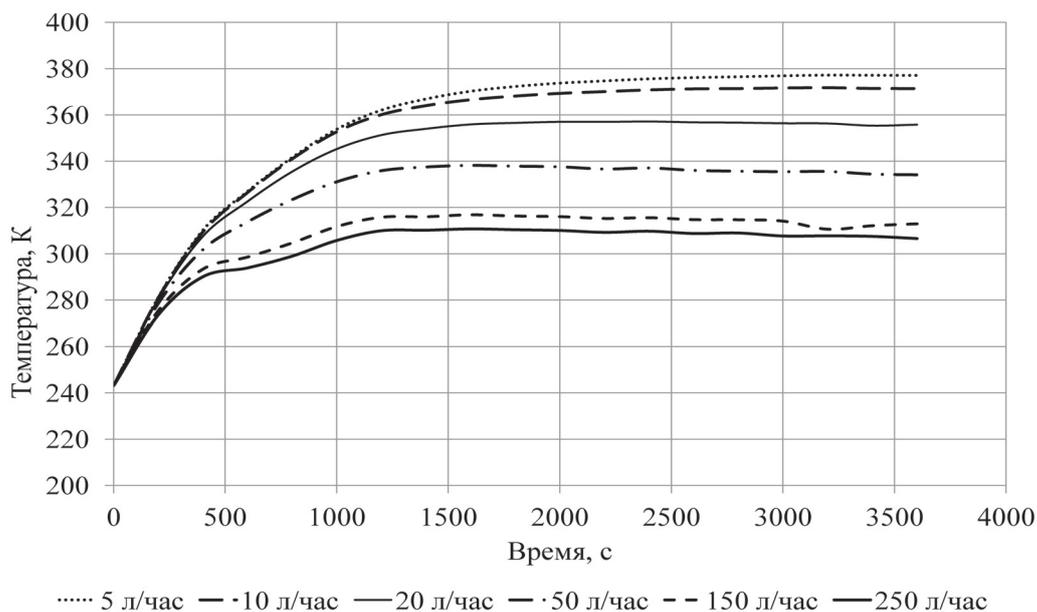


Рис. 4. Время выхода рекуператора в стационарный режим для разных значений производительностей насоса

Fig. 4. Time of recuperator setting to stationary mode for different pump performance values

этим при малых значениях производительности установившаяся температура достигает больших значений. Наиболее предпочтительным является то значение производительности насоса, при котором достигается минимально необходи-

мая температура теплоносителя. Таким образом, исходя из рис. 3, предпочтительной производительностью насоса будут значения менее 20 л/ч. При производительности 20 л/ч время выхода в стационарный режим составляет около 1500 с.

Определение расходных характеристик насоса рекуператора

Определение КПД по приведенной выше методике позволяет построить график зависимости КПД от производительности насоса (рис. 5).

Анализ зависимости показывает, что максимальные значения КПД находятся на отрезке от 1 до 24 л/ч.

Хотя значения КПД на участке от 1 до 4 л/ч высоки, необходимо учесть, что малая скорость течения теплоносителя приводит к его локальному перегреву в трубках рекуператора и последующему охлаждению в отводном патрубке. Поэтому можно считать, что значения рациональных производительностей насоса должны быть более 4 л/ч. С другой стороны, при увеличении производительности свыше 20 л/ч происходит снижение эффективности рекуператора и падение температуры теплоносителя на выходе (см. рис. 3).

Выводы

Созданная твердотельная компьютерная модель при заданных исходных данных и граничных условиях позволила провести моделирование рабочего процесса в рекуператоре.

При моделировании в стационарном режиме установлено, что температура газов на выходе из рекуператора представленной конструкции

является недопустимо высокой и в дальнейшем необходимо проводить оптимизацию конструктивных параметров.

Установлено, что при значениях подачи теплоносителя менее 4 л/ч происходит перегрев жидкости внутри рекуператора, однако в выходном патрубке рекуператора температура существенно ниже, что в первом уменьшает ресурс теплоносителя, а во втором – снижает эффективность работы рекуператора.

Моделирование в стационарном режиме позволило оценить время выхода рекуператора в установившийся режим работы, которое составило около 1500 с.

Оценка эффективности работы рекуператора с помощью определения эксергетического КПД позволила определить диапазон рациональных значений расходных характеристик рекуператора. Исходя из полученных данных, наиболее предпочтительные значения производительности насоса лежат в пределах от 4 до 20 л/ч.

Список литературы

1. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
2. *Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes.* – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

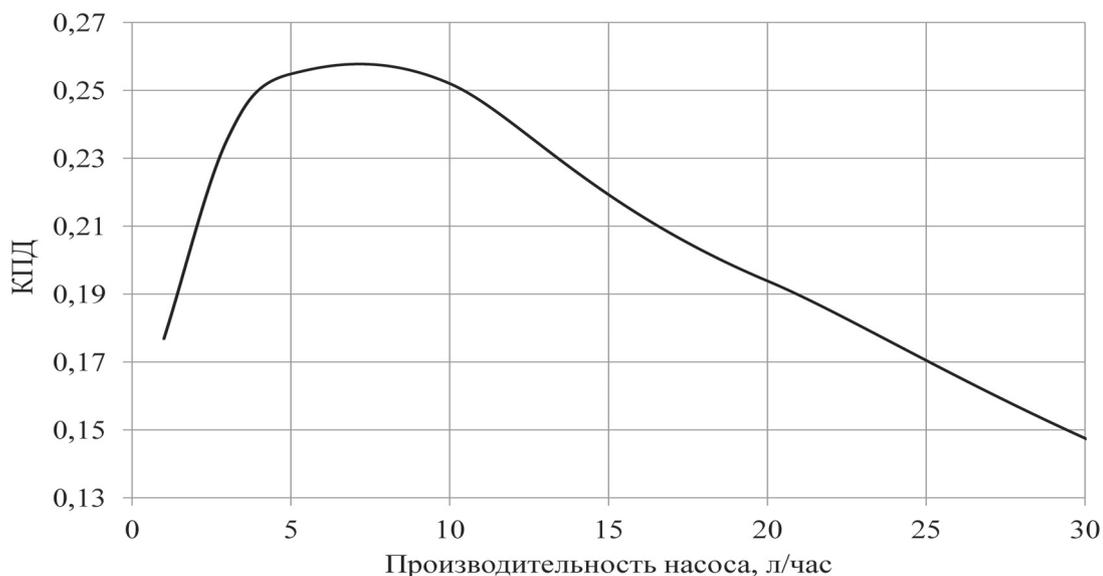


Рис. 5. Зависимость КПД рекуператора от производительности насоса

Fig. 5. Recuperator efficiency versus pump capacity

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

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

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

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

7. Dolgushin A.A., Voronin D.M., Syrbakov A.P. Experiment of using thermal insulating materials for accumulation of heat in the transmission // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 632, iss. 1. – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012014.

8. Chernukhin R.V. Reliability of the steering gear of truck vehicles // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 36–42. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.36.

9. Патент 2595205 Российская Федерация. Система подогрева агрегатов механической трансмиссии транспортного средства / Долгушин А.А., Курносов А.Ф., Вакуленко М.В. – № 2015120140; заявл. 27.05.2015; опубл. 20.08.2016.

10. Lane M.S., Mansour A.H., Harpell J.L. Operations research techniques: A longitudinal update 1973–1988 // *Interfaces*. – 1993. – Vol. 23, N 2. – P. 63–68. – DOI: 10.1287/inte.23.2.63.

11. Short simulation activity to improve the competences in the fluid-mechanical engineering classroom using solidworks flow simulation / M. Rodríguez-Martín, P. Rodríguez-González, A.S. Patrocínio, J.R.S. Martín // *Proceedings of the Seventh International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*. – León Spain, 2019. – P. 72–79. – DOI: 10.1145/3362789.3362809.

12. Bellos E., Tzivanidis C., Antonopoulos K.A. Thermal performance of a direct-flow coaxial evacuated tube with solidworks flow simulation // *6th International*

Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization. – Athens, Greece, 2015. – Vol. 2. – P. 505–513.

13. Nawaz H., Yuan Y.S. Thermal comfort analysis of a ship air-conditioning system using solidworks flow simulation // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 773. – P. 883–888. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.773.883.

14. Law A.M., Kelton W.D. Simulation modeling and analysis. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2000. – 784 p. – ISBN 978-007116537.

15. Peng Y. Research of thermal analysis collaboratively using ANSYS workbench and solidworks simulation // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 127. – P. 262–266. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.127.26.

16. STAR CCM+ CFD simulations of enhanced heat transfer in high-power density electronics using forced air heat exchanger and pumped fluid loop cold plate fabricated from high thermal conductivity materials / K.R. Anderson, M. Devost, W. Pakdee, N. Krishnamoorthy // *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*. – 2013. – Vol. 3, N 4. – DOI: 10.4236/jectc.2013.34016.

17. Internal air flow analysis of a bladeless micro aerial vehicle hemisphere body using computational fluid dynamic / M.N.K. Othman, R.M. Zuradzman, D. Hazry, W. Khairunizam, A.B. Shahriman, S. Yaacob, S.F. Ahmed, A.T. Hussain // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1635, N 1. – P. 182–186. – DOI: 10.1063/1.4903581.

18. Dzelzitis E., Sidenko N. Numerical simulation of heat exchange in discrete-rough channels at flow superimposed oscillations // *18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings*. – Jelgava, Latvia, 2019. – Vol. 18. – P. 1155–1161. – DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N203.

19. Design, simulation and optimization of a solar dish collector with spiral-coil thermal absorber / S.R. Pavlović, E.A. Bellos, V.P. Stefanović, C. Tzivanidis, Z.M. Stamenković // *Thermal Science*. – 2016. – Vol. 20, N 4. – P. 1387–1397. – DOI: 10.2298/TSCI160213104.

20. Simulation and validation of a two-phase pumped loop cooling system / T.C. Magee, K.M. Hines, M.A. Dumesh, A.D. Meekins, M.M. Bridges // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – 2019. – Vol. 59452. – P. V008T09A013. – DOI: 10.1115/IMECE2019-10272.

21. Ivanov A.V., Trebunskikh T.V., Platonovich V.V. Validation methodology for modern CAD-embedded CFD code: from fundamental tests to industrial benchmarks // *NAFEMS World Congress*. – Salzburg, Austria, 2013.

22. *Sobachkin A., Dumnov G.* Numerical basis of CAD-embedded CFD // NAFEMS World Congress. – Salzburg, Austria, 2013. – P. 9–12.

23. *Tsatsaronis G.* Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics // Energy. – 2007. – Vol. 32, N 4. – P. 249–253. – DOI: 10.1016/j.energy.2006.07.002.

24. *Szargut J., Morris D.R., Steward F.R.* Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. – United States, 1987.

25. *Zakirov S.G., Karimov K.F.* Exergy analysis of refrigeration evaporators // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. – Purdue, 2004. – P. 643. – URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/643> (accessed: 05.11.2020).

26. Ethylene glycol: properties, synthesis, and applications / H. Yue, Y. Zhao, X. Maa, J. Gong // Chemical Society Reviews. – 2012. – Vol. 41, iss. 11. – P. 4218–4244. – DOI: 10.1039/c2cs15359a.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Justification of the Flow Characteristics of the Recuperator for the Thermal Preparation of Machinery and Equipment Units

Roman Chernukhin^{1, a, *}, Aleksey Dolgushin^{2, b}, Nikolai Kasimov^{3, c}, Vladimir Ivancivsky^{1, d},
Dmitry Lobanov^{4, e}, Sergey Vasiliev^{4, i}, Nikita Martyushev^{5, g}

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

² Novosibirsk State Agrarian University, 160 Dobrolyubov st., Novosibirsk, 630039, Russian Federation

³ Izhevsk State Agricultural Academy, 11 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russian Federation

⁴ I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-1324-0161>,  Chernuxin@corp.nstu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-7506-6309>,  dolgushin078@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-9009-0836>,  nikolakas@list.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>,  ivancivskij@corp.nstu.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>,  vsa_21@mail.ru,

^g  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 September 2020

Revised: 05 October 2020

Accepted: 07 November 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Simulation modeling

Recuperator

Thermal processes

Thermal preparation

Funding

This work was financially supported within the framework of the NSTU Research and Development Thematic Plan (project No. TP-PTM-1_20 project).

Acknowledgements

The studies were performed at the Collective use center "Structure, mechanical and physical properties of materials" NSTU for help in conducting joint research work.

ABSTRACT

Introduction. Machines and equipment in its composition may contain hydraulic systems to ensure the functioning of the main and auxiliary systems. It is known that a common disadvantage of hydraulic systems and drives is the dependence of the viscosity of the applied fluids on temperature. A noticeable part of technological machines and equipment is located in unheated or poorly heated industrial premises and a change in the viscosity of working fluids with a decrease in the ambient temperature can significantly affect the parameters of technological processes. An important factor in ensuring the stability of the technological processes parameters is the degree of preparation of machines and equipment for operation at low temperatures or in conditions of fluctuating temperature conditions. In this regard, the question arises of ensuring the required temperature of technical fluids before turning on machines and equipment, and maintaining the required thermal regime during the operation of its units and assemblies. One way to solve this problem is to use external heat sources. Various heat exchange devices can serve as such sources. In the heat exchange device, the heat carrier is heated, which is then fed into the heat exchange jacket of the machinery and equipment units. Both liquid and gaseous media are used to heat the coolant in the heat exchanger. In the latter case, the heat exchanger is called a *recuperator*. The efficiency of the recuperator is determined by its design and flow characteristics. There are methods for the analytical determination of both the design and flow characteristics of the recuperator, but these methods are quite laborious. The use of computer simulation of thermal processes makes it possible to successfully solve the calculation problem, and also significantly reduces the design time of heat exchangers. **The aim of the work** is to substantiate the flow characteristics of the recuperator for maintaining the thermal regime through computer simulation. **The research method** is computer simulation of thermal processes, which is implemented using the SolidWorks software package from Dassault Systems and its Flow Simulation application for simulating thermal processes in scientific research and engineering. **Results and discussion.** Simulation carried out in stationary and non-stationary modes made it possible to determine the effect of pump performance on the temperature of the coolant at the outlet of the recuperator. It is found that when the heat carrier flow rate is more than 20 l/h, its temperature does not reach the required values, despite the fact that the gases leaving the recuperator have a significant residual temperature. The efficiency of the recuperator is assessed by determining the exergy efficiency. Based on the data obtained, the most preferable are the pump productivity values lying in the range from 4 to 20 l/h.

For citation: Chernukhin R.V., Dolgushin A.A., Kasimov N.G., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Vasiliev S.A., Martyushev N.V. Justification of the flow characteristics of the recuperator for the thermal preparation of machinery and equipment units. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 82–93. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-82-93. (In Russian).

* Corresponding author

Roman V. Chernukhin, Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 (383) 346-17-97, **e-mail:** Chernuxin@corp.nstu.ru

References

1. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
2. Skeebea V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.
3. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.
4. Skeebea V.Yu. Gibrídnóe tekhnologicheskóe oborudovaniye: povysheniye effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
5. Skeebea V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.
6. Ivancivsky V.V., Skeebea V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4, pp. 19–25.
7. Dolgushin A.A., Voronin D.M., Syrbakov A.P. Experiment of using thermal insulating materials for accumulation of heat in the transmission. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 632, iss. 1, pp. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012014.
8. Chernukhin R.V. Reliability of the steering gear of truck vehicles. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 36–42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.36.
9. Dolgushin A.A., Kurnosov A.F., Vakulenko M.V. *Sistema podogreva agregatov mekhanicheskoi transmissii transportnogo sredstva* [Heating system for mechanical transmission units of a vehicle]. Patent RF, no. 2595205, 2016.
10. Lane M.S., Mansour A.H., Harpell J.L. Operations research techniques: A longitudinal update 1973–1988. *Interfaces*, 1993, vol. 23, no. 2, pp. 63–68. DOI: 10.1287/inte.23.2.63.
11. Rodríguez-Martín M., Rodríguez-González P., Patrocínio A.S., Martín J.R.S. Short simulation activity to improve the competences in the fluid-mechanical engineering classroom using solidworks flow simulation. *Proceedings of the Seventh International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*, León Spain, 2019, pp. 72–79. DOI: 10.1145/3362789.3362809.
12. Bellos E., Tzivanidis C., Antonopoulos K.A. Thermal performance of a direct-flow coaxial evacuated tube with solidworks flow simulation. *6th International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization*, Athens, Greece, 2015, pp. 505–513.
13. Nawaz H., Yuan Y.S. Thermal comfort analysis of a ship air-conditioning system using solidworks flow simulation. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 773, pp. 883–888. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.773.883.
14. Law A.M., Kelton W.D. *Simulation modeling and analysis*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill Education, 2000. 784 p. ISBN 978-0071165372.
15. Peng Y. Research of thermal analysis collaboratively using ANSYS workbench and solidworks simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 127, pp. 262–266. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.127.262.
16. Anderson K.R., Devost M., Pakdee W., Krishnamoorthy N. STAR CCM+ CFD simulations of enhanced heat transfer in high-power density electronics using forced air heat exchanger and pumped fluid loop cold plate fabricated from high thermal conductivity materials. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2013, vol. 3, no. 4. DOI: 10.4236/jectc.2013.34016.
17. Othman M.N.K., Zuradzman M.R., Hazry D., Khairunizam W., Shahrman A.B., Yaacob S., Ahmed S.F., Hussain A.T. Internal air flow analysis of a bladeless micro aerial vehicle hemisphere body using computational fluid dynamic. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1635, no. 1, pp. 182–186. DOI: 10.1063/1.4903581.
18. Dzelzitis E., Sidenko N. Numerical simulation of heat exchange in discrete-rough channels at flow superimposed oscillations. *18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*: Proceedings, Jelgava, Latvia, 2019, vol. 18, pp. 1155–1161. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N203.

19. Pavlović S.R., Bellos E.A., Stefanović V.P., Tzivanidis C., Stamenković Z.M. Design, simulation and optimization of a solar dish collector with spiral-coil thermal absorber. *Thermal Science*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 1387–1397. DOI: 10.2298/TSCI160213104P.
20. Magee T.C., Hines K.M., Dumesh M.A., Meekins A.D., Bridges M.M. Simulation and validation of a two-phase pumped loop cooling system. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2019, vol. 59452, p. V008T09A013. DOI: 10.1115/IMECE2019-10272.
21. Ivanov A.V., Trebunskikh T.V., Platonovich V.V. Validation methodology for modern CAD-embedded CFD code: from fundamental tests to industrial benchmarks. *NAFEMS World Congress*, Salzburg, Austria, 2013.
22. Sobachkin A., Dumnov G. Numerical basis of CAD-embedded CFD. *NAFEMS World Congress*, Salzburg, Austria, 2013, pp. 9–12.
23. Tsatsaronis G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 2007, vol. 32, no. 4, pp. 249–253. DOI: 10.1016/j.energy.2006.07.002.
24. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. United States, 1987.
25. Zakirov S.G., Karimov K.F. Exergy analysis of refrigeration evaporators. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, 2004, p. 643. Available at: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/643> (accessed 05.11.2020).
26. Yue H., Zhao Y., Maa X., Gong J. Ethylene glycol: properties, synthesis, and applications. *Chemical Society Reviews*, 2012, vol. 41, iss. 11, pp. 4218–4244. DOI: 10.1039/c2cs15359a.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние технологии горячего формообразования плит из алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) на сопротивление усталостному разрушению

Кирилл Захарченко^{1, 2, а, *}, Владимир Капустин^{2, 1, b}, Алексей Ларичкин^{1, 3, c}, Ярослав Лукьянов^{1, d}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-2626-6184>, zaharchenkok@mail.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6124-2503>, macler06@mail.ru,

^с <https://orcid.org/0000-0002-7306-9522>, larichking@gmail.com, ^д <https://orcid.org/0000-0003-4526-9399>, lukyjanov@hydro.nsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.389:539.43: 621.77.07

История статьи:

Поступила: 11 августа 2020
 Рецензирование: 26 августа 2020
 Принята к печати: 14 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Алюминиево-литиевый сплав
 Упругопластическое деформирование
 Деформационные характеристики
 Ползучесть
 Формообразование
 Структура
 Метод ускоренной оценки сопротивления усталостному разрушению
 Метод конечных элементов

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-48-543028.

Благодарности:

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру-технологу филиала ПАО «Компания «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова», кандидату технических наук Галине Апсаттаровне Раевской за консультацию в работе.

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных задач развития перспективных изделий авиационной техники является снижение веса конструкции летательных аппаратов. Решить эту задачу можно, применяя в конструкции деталей новые материалы из алюминиевых сплавов пониженной плотности, легированных литием, например В-1461. Использование этих материалов в самолетостроении ограничивается технологией обработки, которая не должна повреждать материал и снижать его прочностные свойства. К таким технологиям можно отнести обработку давлением с нагревом, когда активизируются процессы ползучести и материал переходит в состояние, близкое к сверхпластичности. **Цель работы:** оценка влияния обработки алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Mg-Zn-Cu) давлением в режиме ползучести на прочность. **В работе исследовано** влияние технологии обработки давлением алюминиевых сплавов В-1461 и В95 на сопротивление усталостному разрушению. **Методы.** В работе используется метод, позволяющий определить предельные напряжения при помощи диаграмм накопления необратимых деформаций, а также метод формообразования толстых плит (40 мм) в режиме ползучести. Применяются ранее подобранные оптимальные температуры для формования плит. Используется бесконтактная координатно-измерительная система для проведения контроля поверхности после формования. Выполнена фратография излома образцов сплавов В-1461 и В95 после усталостного разрушения. Проведено математическое моделирование процесса деформирования плит в условиях ползучести в пакете MSC.Marc. **В результате** получена консервативная оценка предела выносливости для алюминиевых сплавов В-1461 и В95. Выполнено формообразование толстых плит в режиме ползучести. Более 80 % поверхности плиты отформовано с отклонением менее 1 мм от целевого размера. Проведены усталостные испытания образцов, изготовленных из отформованных панелей сплавов В-1461 и В95, построены усталостные кривые. Фратография поверхности усталостного излома показала наличие окислов у образцов сплава В-1461 в отличие от сплава В95. **Обсуждаются результаты** испытаний на усталость, показывающие, что характеристики технологического процесса формообразования и термообработки не ухудшают усталостные свойства исследованных сплавов. Сравнительные испытания показали, что сплав В-1461 имеет более высокие усталостные характеристики. Математическое моделирование показало, что использование закона установившейся ползучести Бойла – Нортон недостаточно для описания процесса формовки плиты; отмечена необходимость постановки обратной задачи формообразования, где в качестве граничных условий должны выступать координаты пуансонов нагружающего устройства.

Для цитирования: Влияние технологии горячего формообразования плит из алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) на сопротивление усталостному разрушению / К.В. Захарченко, В.И. Капустин, А.Ю. Ларичкин, Я.Л. Лукьянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 94–109. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-94-109.

*Адрес для переписки

Захарченко Кирилл Владимирович, к.т.н., ст. преподаватель
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: +7 (383) 346-17-64, e-mail: zaharchenkok@mail.ru

Введение

Несмотря на широкое использование композиционных материалов в авиационной технике [1], возможности высокопрочных алюминиевых сплавов еще не исчерпаны. Стоит обратить внимание на алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu, которые традиционно занимают нишу основного материала для изготовления силовых элементов планера самолетов. В последние годы широко исследуются перспективы применения высокопрочного алюминиево-литиевого сплава марки В-1461 (аналог 2099) в конструкциях новых самолетов взамен В95оч [2]. Механические свойства материала В-1461 превосходят таковые у материала В95: плотность на 25 % ниже, модуль упругости на 9 % выше, удельная прочность на 11 % выше, предел текучести на 14 % выше, характеристики жаропрочности и коррозионной стойкости в 1,5...2 раза выше [3].

Решая задачи авиационной техники, связанные со снижением веса конструкции летательных аппаратов (ЛА), можно предложить:

1) применение в конструкции деталей из новых алюминиевых сплавов пониженной плотности, например В-1461, легированных литием, каждый процент содержания которого снижает плотность сплава на 3 % и повышает модуль упругости на 6 % [1, 3, 4];

2) использование в обработке металлов давлением явления ползучести и деформирование заготовок деталей в условиях, близких к сверхпластичности для заданного сплава, с последующей операцией возврата свойств материала уже деформированной заготовки, что обеспечит сохранение ресурса, позволит уменьшить вес конструкции [5], сократит время и снизит затраты на изготовление габаритных изделий.

Рассматриваемый технологический процесс формообразования в режиме ползучести и близком к сверхпластичности был реализован на установке УФП-1М [6, 7], которая обеспечивает изготовление панели в заданном поле предельных отклонений на размер, допусков формы и расположения поверхностей.

Так как проблема прочности авиационных материалов

при циклических нагрузках важна в самолетостроении, то и оценка влияния технологии формообразования на сопротивление усталостному разрушению для сплавов В95 и В-1461 актуальна.

Тестирование образцов материала при помощи ускоренного метода [8] позволяет сократить трудоемкость и длительность процесса усталостных испытаний. Согласно авиационным правилам МАК, пригодность и долговечность материалов, используемых для изготовления деталей летательных аппаратов (ЛА), поломка которых может повлиять на безопасность, должны сопровождаться экспериментальной проверкой.

Целью данной работы является оценка влияния обработки металлов давлением в режиме ползучести на сопротивление усталостному разрушению.

Методика исследований

Образцы для испытаний

Для сокращения объема усталостных испытаний исследовались деформационные свойства образцов сплава. Эти исследования позволяли оценить предельное напряжение усталости материала по диаграмме накопления необратимых деформаций. Использовались образцы типа IV по ГОСТ 25.502–79. Для испытаний на усталость использовались образцы типа VII по ГОСТ 25.502–79, $K_t = 2,6$, изготовленные из плиты В-1461Т1, В95 (рис. 1). K_t – теоретический коэффициент концентрации нормальных напряжений.

Оборудование

Для определения деформационных свойств и циклической долговечности образцов из материала, подвергнутого формообразованию, при

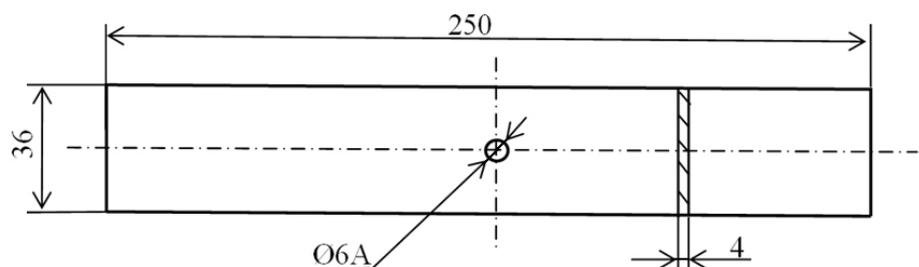


Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Fig. 1. Fatigue test specimen

сравнительных испытаниях применялась испытательная универсальная система Instron 8801. При испытании образцов реализовывалось мягкое нагружение. Для измерения приращения компонентов тензора полных деформаций использовались штатные экстензометры: № 2620-601 Dynamic Extensometer, № W-E-404-F Transverse/Diametral Extensometer.

Для проведения формовки плит из алюминиевых сплавов В-1461, В95 применялось универсальное технологическое оборудование – установка формообразования панелей в режимах ползучести УФП-1М [9]. Для термообработки плит после формообразования использовался воздушно-закалочный агрегат ВЗА-6, для старения – печь аэродинамического нагрева ПАП-27.

Контроль соответствия поверхности формованных плит от заданной теоретической модели осуществлялся при помощи бесконтактной координатно-измерительной системы на базе лазерного радара MV 224. Погрешность измерений для размеров до 5000 мм не превышала 22,5 мкм. Микроструктура исследовалась с помощью микроскопа MERLIN Compact VP.

Определение деформационных характеристик материала при циклическом нагружении

При исследовании новых материалов обычно определяют предельные напряжения (ГОСТ 23207–78) разрушающим способом. В рамках данной работы для выяснения величин предельных напряжений использована методика, принцип которой описан в работе [8], согласно чему предельные напряжения могут быть определены с помощью диаграммы накопления необратимых деформаций или по температуре диссипативного разогрева материала.

На рис. 2 в координатах $\epsilon_{x \max}$, $\epsilon_{y \max}$, $\epsilon_{x \min}$, $\epsilon_{y \min}$ от $\sigma_{x \max}$, $\sigma_{x \min}$ представлены экспериментальные диаграммы накопления необратимых деформаций гладких образцов из сплава марки В-1461 по программе со ступенчато увеличивающейся нагрузкой – при отнулевых циклах растягивающих (2), сжимающих (3) и симметричном (1) цикле напряжений. Индекс «x» означает направление вдоль образца (направление приложении нагрузки), «y» – поперечное направление.

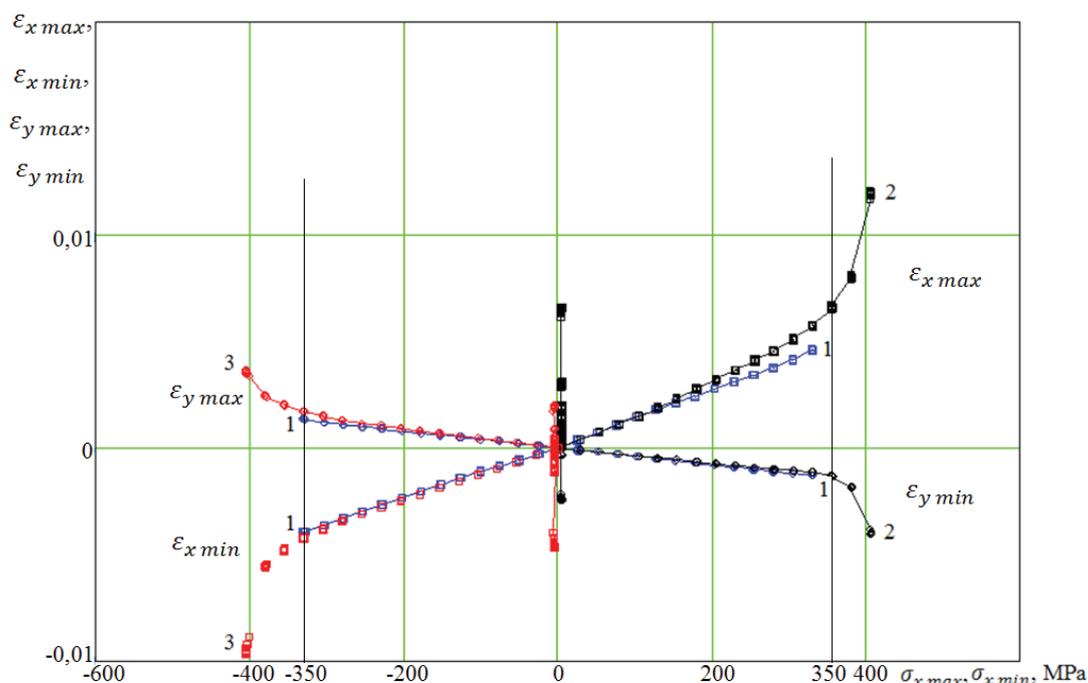


Рис. 2. Накопление необратимых деформаций при ступенчатом увеличении напряжений. Сплав В-1461

Fig. 2. Irreversible deformations accumulation for smooth samples with a stepwise increased loading. Al-Cu-Li-Zn alloy

Из диаграммы накопления необратимых деформаций, представленной на рис. 2, видно, что деформирование материала В-1461 при отнулевом цикле как в области растягивающих напряжений (2) так и в области сжимающих напряжений (3) происходит симметрично. Это характеризует изотропию свойств материала В-1461, не зависящую от знака напряжений в процессе периодического нагружения.

При амплитуде, превышающей 175 МПа, в области как растягивающих, так и сжимающих напряжений в материале образца активизируются диссипативные процессы, о чем свидетельствует накопление необратимых деформаций.

Оценки пределов выносливости для сплавов В-1461 и В95 соответствуют $\sigma_{x \max} = 350$ МПа и $\sigma_{x \max} = 250$ МПа соответственно [10].

Уровни напряжения, при которых проводились усталостные испытания образцов сплава марки В95, больше предельного напряжения для этого материала, определенного по ускоренной методике на гладких образцах. Используя предел выносливости материала (образец без концентратора напряжений), который составлял 250 МПа, определялся расчетный предел выносливости образца с отверстием по формулам [11]:

$$K_{ff} = q(K_t - 1) + 1; \quad (1)$$

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_f}{K_{ff}}, \quad (2)$$

где K_{ff} – расчетный усталостный коэффициент выреза при действии нормальных напряжений, определяемый на основании среднего значения q – коэффициента чувствительности материала к концентрации напряжений, который для алюминиевого сплава равен 0,85 при радиусе отверстия $r = 3$ мм [11]; σ_f и σ_{ff} – пределы ограниченной выносливости образца при осевом нагружении без концентратора и с концентратором напряжений соответственно.

Тогда для сплава В95

$$K_{ff} = q(K_t - 1) + 1 = 0,85(2,6 - 1) + 1 = 2,36;$$

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_f}{K_{ff}} = \frac{250}{2,36} = 106 \text{ МПа.}$$

Первый и второй уровни напряжений ($\sigma_{\max 1}^{\text{нетто}}$ и $\sigma_{\max 2}^{\text{нетто}}$) для образца сплава В95 с концентратом напряжений, при которых проводились усталостные испытания, выше, чем предел ограниченной выносливости ($\sigma_{ff} = 106$ МПа), полученный при ускоренной оценке.

Для сплава В-1461 назначенные уровни напряжений при испытаниях были такими же, что позволяло оценивать сопротивление усталостному разрушению материалов. При этом разница между напряжением при испытаниях и предельным напряжением ($\sigma_{ff} = 148$ МПа) была меньше. Это позволяло получить сравнительную оценку свойств материалов на базах до 10^6 циклов.

Технологический процесс формообразования плиты сложной геометрии

Технологический процесс формообразования плит (1800×800×40 мм) в режиме ползучести на установке УФП-1М (НАЗ им. В.П. Чкалова) описан в [9]. Как следует из [10, 12], оптимальной температурой для формования толстой панели из В-1461 выбрана температура T , равная 470 °С, а для В95 – 420 °С. Для сплава В-1461 данная температура является температурой проката плит [13].

Термообработка формообразованных плит включала в себя закалку и старение [10, 12].

Статистическая обработка результатов

Для построения кривых распределения долговечности и пределов выносливости, а также оценки средних значений и среднеквадратичных отклонений результаты испытаний подвергают статистической обработке.

Статистическая обработка результатов усталостного эксперимента выполнена на основе гипотезы о логарифмически нормальном законе распределения долговечности. Числовые характеристики распределения непрерывных случайных величин определены по следующим формулам:

– математическое ожидание

$$\bar{x} = \lg N_{cp} = (\sum \lg N_i) / n; \quad (3)$$

– среднеквадратичное (стандартное) отклонение

$$S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}; \quad (4)$$

– доверительный интервал на математическое ожидание

$$\bar{x} - t_q S_n / n^{1/2} < a < \bar{x} + t_q S_n / n^{1/2}, \quad (5)$$

где t_q – критерий Стьюдента; n – объем выборки.

Результаты и их обсуждение

Усталостные характеристики образцов из плит В-1461 и В95 после формообразования и термообработки

После выполнения формообразования из плит изготавливались образцы для усталостных испытаний на установке Instron 8801. Испытание образцов проводилось на двух уров-

нях нагружения при максимальном напряжении цикла $\sigma_{\text{Макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа и $\sigma_{\text{Макс2}}^{\text{нетто}} = 196$ МПа, с коэффициентом асимметрии $R = 0$, на частоте $f = 3$ Гц.

Результаты усталостных испытаний образцов приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что для сплава В95 пределы ограниченной выносливости и доверительные интервалы (доверительная вероятность $P = 0,95$) материала соответствуют описанным в [14, с. 135]. Средние значения долговечности на исследуемых уровнях нагружения сплава В95 равны $1,1 \cdot 10^5$ и $4,5 \cdot 10^4$ циклов при $\sigma_{\text{Макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа и $\sigma_{\text{Макс2}}^{\text{нетто}} = 196$ МПа соответственно.

Предел ограниченной выносливости для сплава В-1461 при уровне напряжения $\sigma_{\text{Макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа, как следует из [3], лежит в интервале $1,6 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^5$ циклов. Однако из рисунка видно, что циклическая долговечность при $\sigma_{\text{Макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа имеет значительное рассеяние:

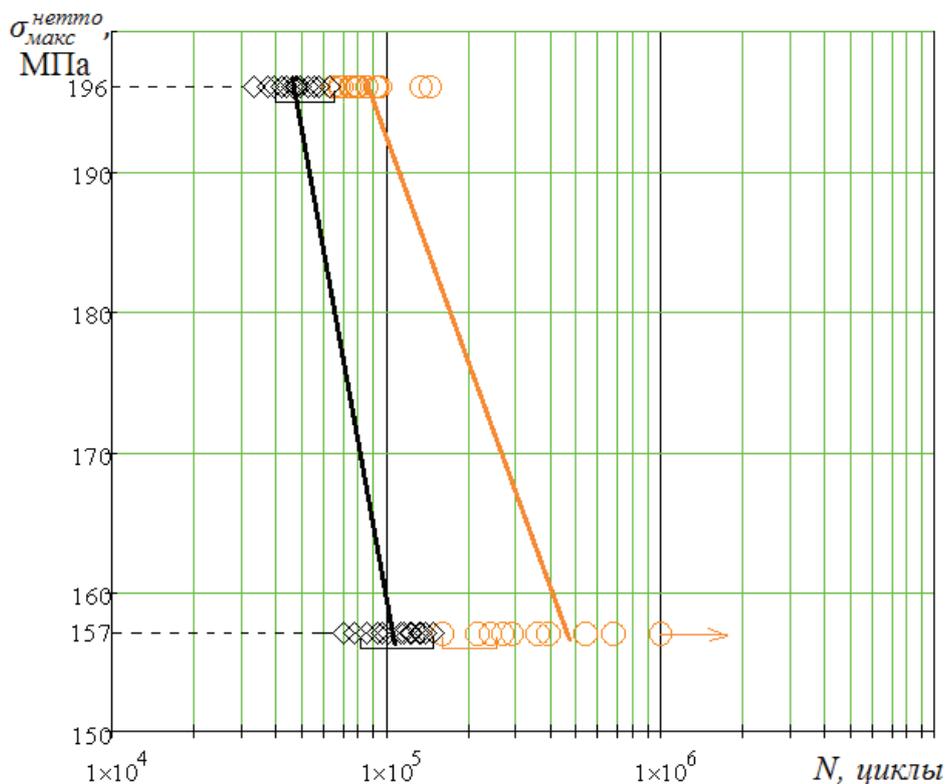


Рис. 3. Влияние обработки металлов давлением в режиме ползучести на выносливость:

◇ – сплав В95; ○ – сплав В-1461, □ – доверительный интервал

Fig. 3. Effect of metal shaping in creep mode on enduring quality:

◇ – Al-Zn-Mg-Cu alloy; ○ – Al-Cu-Li-Zn alloy; □ – confidence interval

от $1,6 \cdot 10^5$ до 10^6 циклов. Причем более 30 % образцов на этом уровне ($\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа) не разрушилась. Средние значения долговечности сплава В-1461: $4,5 \cdot 10^5$ и $8,6 \cdot 10^4$ при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа и $\sigma_{\text{макс2}}^{\text{нетто}} = 196$ МПа соответственно.

Сравнительный анализ циклических испытаний материалов В95 и В-1461 показывает, что средние значения долговечности на исследуемых уровнях напряжения для сплава В-1461 не меньше указанных в [3] при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа, а по отношению к сплаву В95 больше в 4 раза и в 1,8 раза – при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}}$ и $\sigma_{\text{макс2}}^{\text{нетто}}$ соответственно.

В сравнении с показателями долговечности, указанными в [3, 14], для сплава В95 они не ухудшались, а для сплава В-1461 получено повышение характеристик малоциклового устало-

сти для образцов после технологической обработки более чем в 3 раза [3].

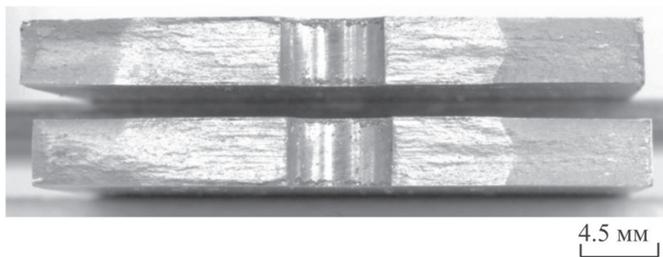
Формирование в микроструктуре сплава В-1461 при температуре 470°C равномерно распределенных дисперсных интерметаллидных фаз повышает относительное удлинение и снижает предел текучести [13, 15].

Необходимо отметить, что результаты испытаний не выявили зависимости значений долговечности образцов от места вырезки заготовок из плиты.

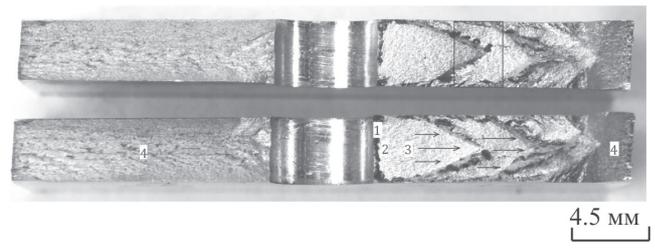
Фрактографические исследования

На рис. 4 приведены фотографии типовых усталостных изломов образцов из сплавов марок В95 (рис. 4, а) и В-1461 (рис. 4, б).

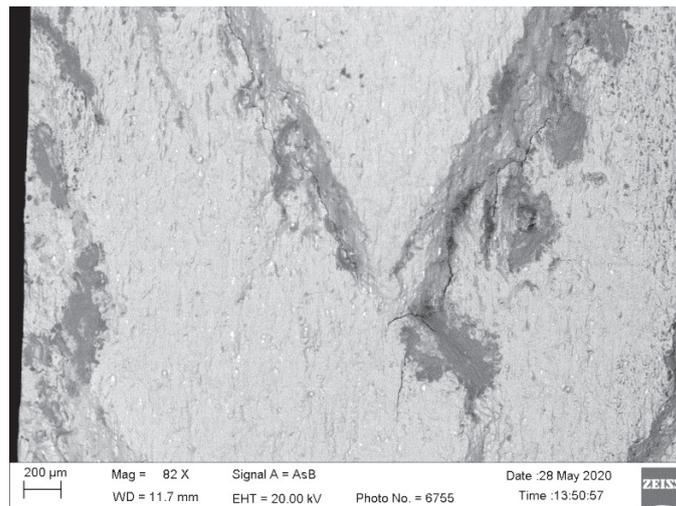
В образце сплава В-1461 очаг усталостного разрушения формируется типичным образом – с поверхности 1 (рис. 4, б) в условиях окружающей среды. Поэтому деформация в зонах кон-



а



б



в

Рис. 4. Поверхности изломов образцов из плит сплавов марок В95 и В-1461:

а – сплав В95; б, в – сплав В-1461

Fig. 4. Fracture surfaces of samples cut out of Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu plates:

а – Al-Zn-Mg-Cu alloy; б, в – Al-Cu-Li-Zn alloy

центрации напряжения протекает с процессами окисления. Фокус излома 2, как оказалось, можно проследить по наличию черных точек – они располагаются в той зоне металла, где наиболее интенсивно протекает его деформация и где раскрывается трещина, в которую неизбежно попадает кислород из атмосферы (рис. 4, б). 3 – участок ускоренного развития излома. На удалении от зоны старта трещины с одной стороны от концентратора с поверхности и с другой стороны от концентратора происходит квазихрупкое разрушение материала – зона долома 4. Влияние воздействия окружающей среды на поведение материалов широко освещено в научной литературе [16–18].

Металлографические исследования поверхности излома образца марки В-1461 (рис. 4, в – увеличенный фрагмент, обозначенный черным квадратом на рис. 4, б), выполненные в заводской лаборатории, показывают, что в местах скопления черных точек (каверн) проходит трещина. Аналогичные наблюдения отсутствуют на сплаве марки В95 – возможно, по причине иного химического состава.

Для выяснения причин разрушения было необходимо определить химический состав точек черного цвета на поверхности излома в сплаве В-1461 (место выделено черным квадратом). Был выполнен микрорентгеноспектральный анализ с использованием микроанализатора EDS X-Act (фирма Oxford Instruments). Показано, что эти места содержат большое количество кислорода (рис. 5, б, г). В остальных зонах излома кислород отсутствует (рис. 5, в, д). Элементный состав близок к составу высокопрочного сплава.

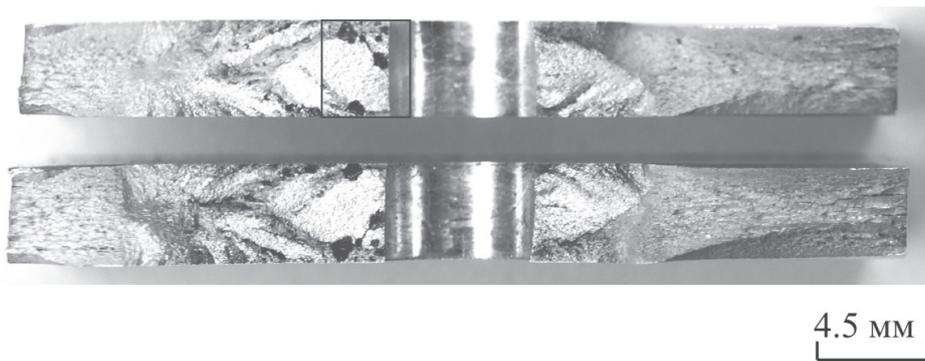
Сравнение отформованной и целевой поверхностей

С помощью лазерного радара MV 224 на поверхности отформованной плиты определены пространственные координаты характерных точек, что позволило вычислить отклонения координат этих точек от целевой (номинальной) формы объекта. Анализ полученных данных после формообразования плиты показал хорошее соответствие; максимальные отклонения в контрольных точках находятся в диапазоне от –9,27 до +5,37 мм (рис. 3). Не более 2,5 % площади плиты деформировано с отклонением от теории менее 9,27 мм. Более 80 % площади плиты деформировано с отклонением менее 1 мм.

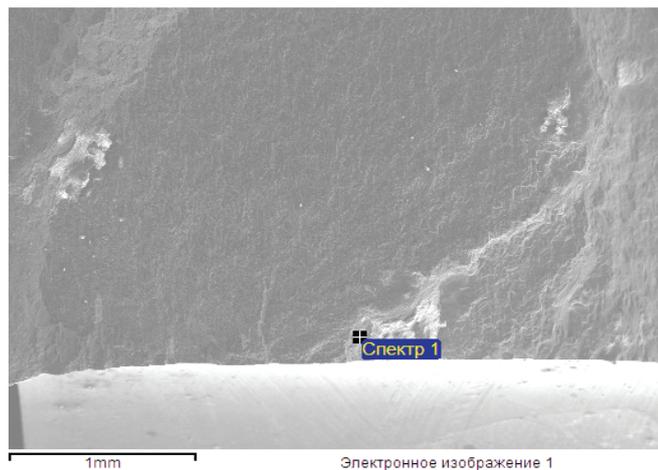
Было проведено конечноэлементное моделирование процессов формообразования плит из сплавов В95 (Al-Cu-Mg-Zn) и В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) в расчетном пакете MSC.Marc 2012 с граничными условиями формовки, аналогичными тем, которые были в эксперименте. Материалы задавались изотропно упругими, а закон установившейся ползучести принимался в виде степенной зависимости Бойла – Нортон. Параметры упругости и ползучести исследуемых материалов приведены в работе [9]. Параметры модели для материала В95 выбирались соответствующими температуре T , равной 420 °С, а для плиты из В-1461 – 470 °С, как оптимальные для деформирования плиты 50 мм. Пуансоны как твердые тела, с помощью которых совершалось деформирование, размещались относительно панели согласно их положению при натурном испытании. Возле плиты располагались две группы пуансонов с обеих сторон от плиты оппозитно друг другу на расстоянии 180 мм и на расстоянии 65 мм от плиты, которая находилась в плоскости симметрии пространства печи. Процесс дискретизации определяющих уравнений для решения при помощи метода конечных элементов (МКЭ) приведен в работе [19].

Сравнение форм целевой поверхности плиты с результатами моделирования для материала В95 приведено на рис. 6.

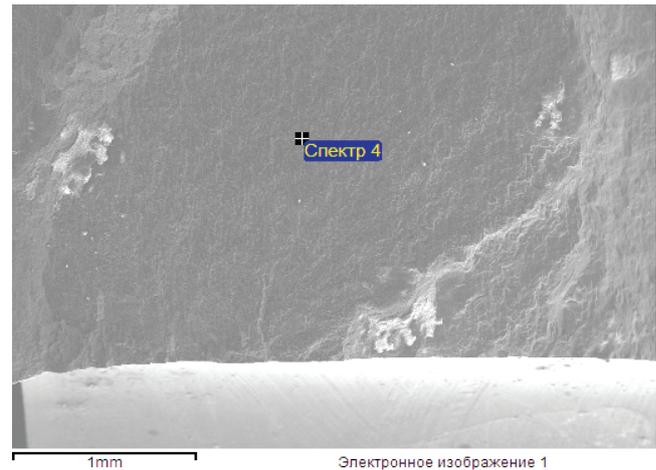
Алгоритм работы. Для того чтобы сравнить две поверхности или меру отличия двух тел после деформирования прямой плиты в условиях ползучести, необходимо иметь mesh-модели, т. е. сетки целевой плиты и плиты, полученной в результате моделирования, в виде файла текстовых данных с координатами узлов конечных элементов. Это можно сделать, переведя сетки в программу конечноэлементного моделирования MSC.Marc и выгрузив их либо в виде файла input MCS.Marc data (*.dat файл), либо в виде файла результатов (*.rpt, текстовый файл Marc report), либо в виде файла для дальнейшей работы в пакете Patran (*.pbn). Для работы с данными в первом случае необходимо подготовить данные координат узлов. Файлы должны содержать только координаты узлов, разделенные пробелом и отступом строки. Далее в программу MeshLab импортируются оба множества точек (для целевой формы и для формы, полученной в результате моделирования). Затем, используя функцию



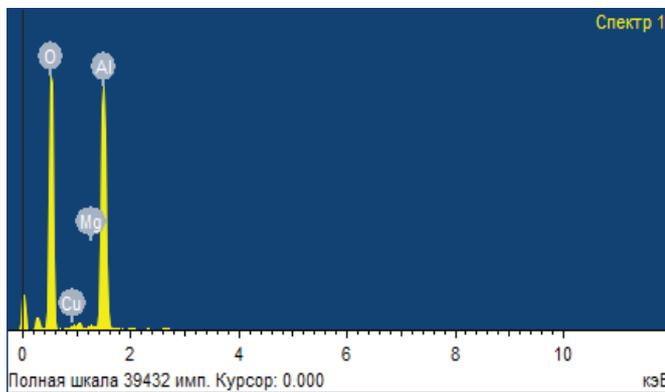
a



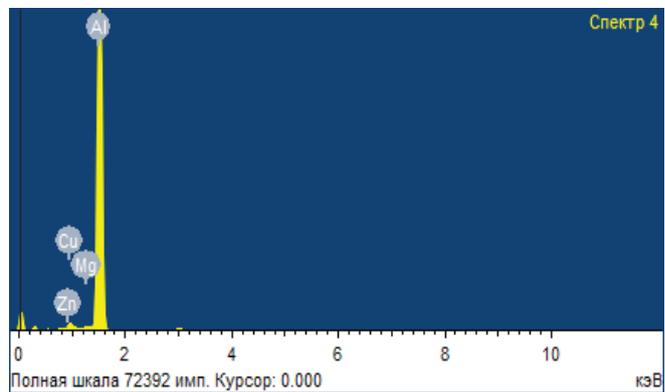
б



в



г



д

Рис. 5. Спектр элементного состава поверхности излома образцов из плиты сплава марки В-1461:
а – сплав В-1461; б, г – соответствует зоне 1 – очаг излома; в, д – соответствует зоне 3 – участку
ускоренного развития излома

Fig. 5. Spectrum of the elemental composition of the fracture surface of specimens cut out of a Al-Cu-Li-Zn alloy plate:

a – Al-Cu-Li-Zn alloy; б, г – corresponds to zone 1 – fracture center; в, д – corresponds to zone 3 – the area of the accelerated fracture propagation

сравнения по мере Хаусдорфа, для каждой точки проводится вычисление расстояния между ближайшими узлами двух сеток. После этого файл данных *.ply выгружается в текстовом виде. Дальнейший анализ данных проводится по точ-

кам в программе Microsoft Excel. Результат сравнения двух сеток приведен на рис. 7.

На рис. 6 приведено сравнение абсолютных отклонений по оси Z между расчетной и целевой формой, которое проводилось для 14 различных

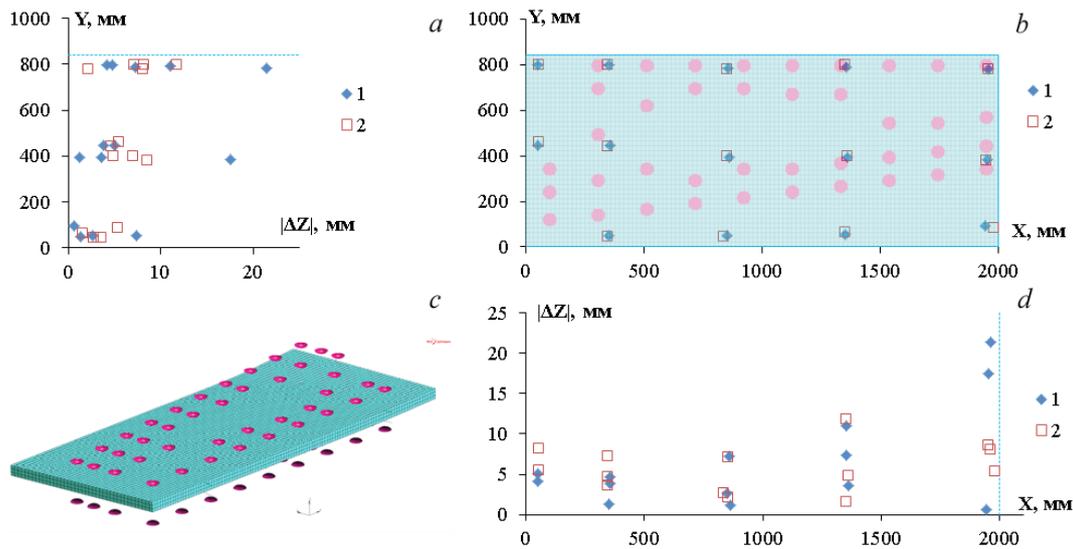


Рис. 6. Вид конечноэлементной модели и сравнение абсолютных отклонений по оси Z между расчетной формой, целевой формой и данными эксперимента для сплава В950ЧТ2. Сравнение отклонений:

1 – между целевой формой и экспериментом; 2 – отклонения между целевой формой и расчетной формой; a – контрольные точки, в которых производилось сравнение отклонений; c – конечноэлементная модель плиты с размещенными возле нее пуансонами; b, d – сравнение абсолютных отклонений по оси Z вдоль осей Y и X соответственно

Fig. 6. View of the finite element model and comparison of the absolute deviations along the Z axis between the designed shape, target shape and experimental data for the Al-Zn-Mg-Cu alloy. Comparison of deviations:

1 – between the target shape and the experiment; 2 – deviation between the designed shape and target shape; a – control points at which deviations are compared; c – finite element model of a plate with punches placed near it; b, d – comparison of absolute deviations along the Z axis along the Y and X axes, respectively

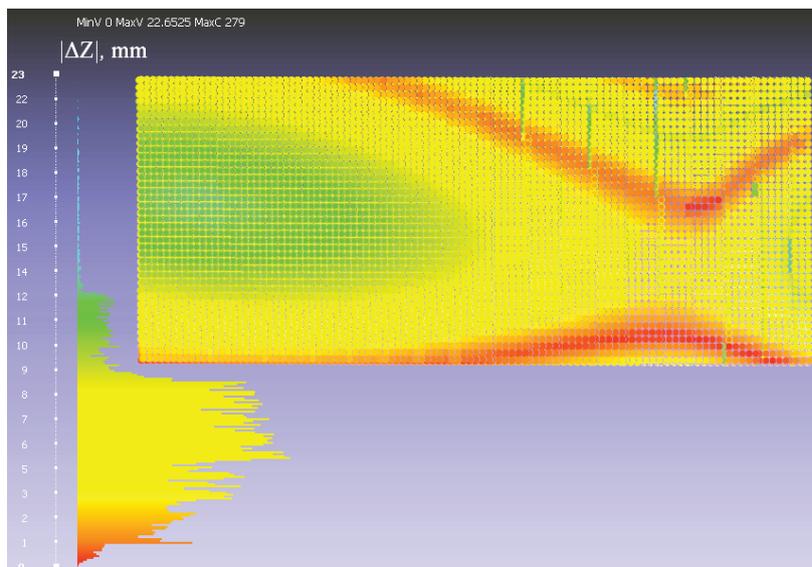


Рис. 7. Результат сравнения сеток целевой формы панели и полученной при моделировании в программе MeshLab, шкала отклонений абсолютных величин

Fig. 7. The result of comparing the grids of the panel target shape and that obtained during modeling in MeshLab, the scale of deviations of absolute values

точек на поверхности плиты (рис. 6, *a*). Анализ отклонений показал, что приложение аналогичных эксперименту граничных условий для тех же временных рамок и материала дает отклонение расчетной плиты (маркер 1) от целевой формы, но в абсолютных величинах меньшее, чем отклонение формы плиты в эксперименте (маркер 2) от целевой. Результат моделирования плиты получился отличным от целевой формы, что можно объяснить: 1) простотой модели ползучести, неучетом температурных эффектов и сложности реологии материала (различие свойств ползучести при растяжении и сжатии, анизотропия свойств ползучести); 2) неудачным выбором перемещений пуансонов вдоль оси Z ; 3) неудачным вариантом размещения пуансонов.

На рис. 7 приведены результат сравнения формы плиты, рассчитанной в пакете MSC.Marc 2012, и целевой формы плиты для материала B95. Сравнение моделей двух тел проводилось по мере Хаусдорфа в программе MeshLab. Модели выгружались в программу в виде координат узлов. Мера Хаусдорфа определялась как кратчайшее расстояние от ближайших точек двух моделей. На шкале приведена разница координат по оси Z между близкими точками.

На рис. 8 приведены сетки панелей в изометрической проекции для деформированной и целевой формы. Рисунок демонстрирует разницу проекций панели для координатных плоскостей XZ и YZ . Поскольку в данном случае деформации плиты были небольшими, то визуально сложно оценить разницу поверхностей плит, поэтому оптимальным остается сравнение форм средствами MeshLab.

На рис. 9 приведена конфигурация плиты из алюминий-литиевого сплава B-1461, полученная при моделировании КЭ для случая температуры деформирования T , равной 470 °С. Стоит отметить, что для принятого закона ползучести уровень остаточных напряжений в плите при данной температуре не превышает 1,7 МПа. Однако нужно учитывать, что уровень остаточных напряжений повысится при охлаждении плиты до нормальной температуры.

По представленному выше алгоритму сравнения геометрии двух плит было проведено сравнение рассчитанной при моделировании формы плиты с целевой формой плиты для сплава B-1461.

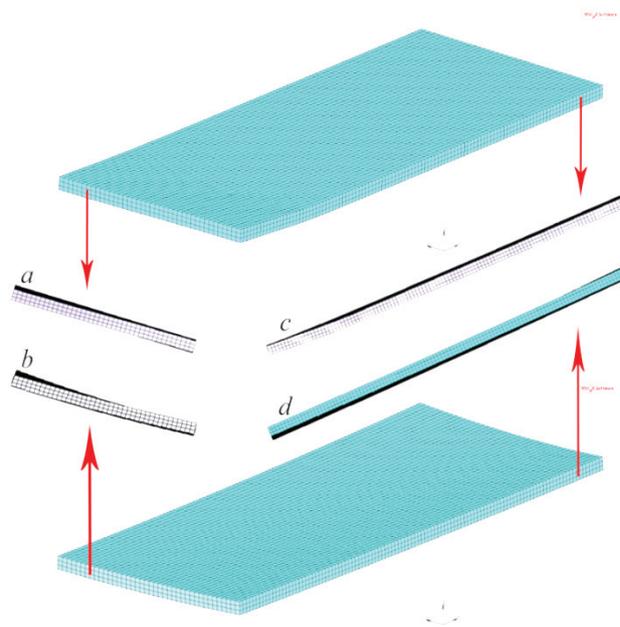


Рис. 8. Вид сетки конечных элементов

для деформированной панели: *a* – проекция панели на плоскость YZ ; *c* – проекция на плоскость XZ . Для целевой панели: *b* – проекция панели на плоскость YZ ; *d* – проекция на плоскость XZ

Fig. 8. Finite element mesh view

for a deformed panel: *a* – panel projection onto the YZ plane; *c* – projection onto the XZ plane. For the panel: *b* – projection of the panel on the YZ plane; *d* – projection onto the XZ plane

На рис. 10 показана разница между формами в результате моделирования плиты № 2 и целевой формой плиты при заданном расположении и перемещении штоков установки, взятыми как в эксперименте. Шкала показывает разницу ближайших точек двух форм по мере Хаусдорфа в направлении оси OZ . На рисунке видно несовпадение форм плит. Из приведенного сравнения можно сделать вывод о необходимости постановки и решения обратной задачи формообразования с учетом свойств физической нелинейности материала плиты и ее упругой разгрузки после деформирования. Один из подходов к решению данной задачи приведен в работе [20]. Стоит отметить, что прогнозированием свойств исследуемых сплавов при длительном воздействии повышенных температур, в том числе с использованием более сложных законов ползучести, занимаются авторы работ [21–23]. Для исследователей основными задачами поиска являются определение взаимосвязи концентрации дислокаций в металлах со скоростью деформирования и значением предельной деформации

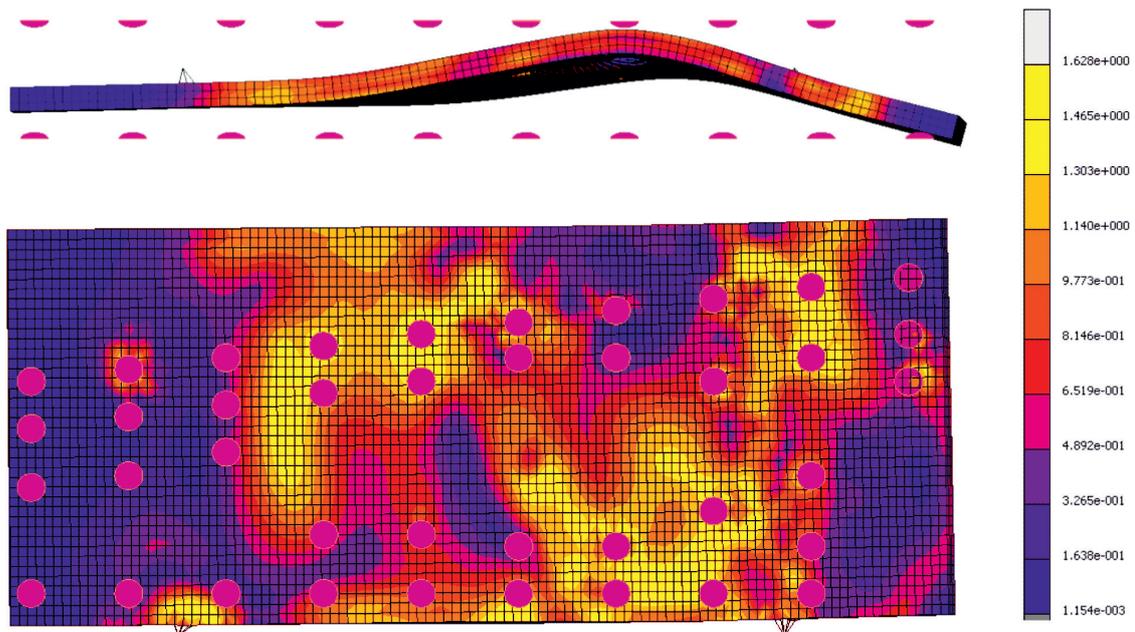


Рис. 9. Конфигурация плиты из сплава В-1461 после деформирования и снятия нагрузки, а также распределение интенсивности остаточных напряжений по Мизесу

Fig. 9. Configuration of a FE model of plate made of Al-Cu-Li-Zn alloy after deformation and unloading, as well as the distribution of the intensity of residual stresses according to Mises

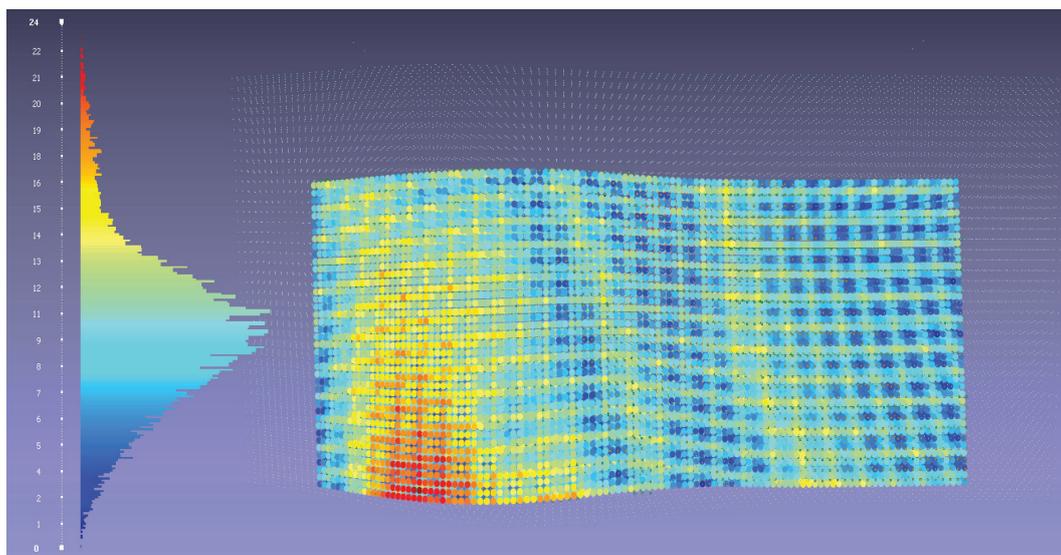


Рис. 10. Различие форм результатов моделирования плиты и целевой формы сплава В-1461, шкала отклонений абсолютных величин

Fig. 10. The difference between the FE modeling result of the plate and target shape for alloy Al-Cu-Li-Zn, the scale of deviations along the Z axis

до разрушения, а также выяснения влияния процесса старения материала на ударную вязкость. Для описания ползучести используются законы на основе гиперболического синуса, содержащие большое количество параметров, определяемых из экспериментальных данных, что предполагает использование оптимизационных процедур и ал-

горитмов. Математическая постановка обратных задач в условиях ползучести представлена в [24].

Стоит отметить, что целевая форма плиты и форма, полученная при моделировании, имеют различия, однако сопоставление форм рассчитанной плиты и формы целевого изделия (рис. 11) показывает хорошее соответствие:

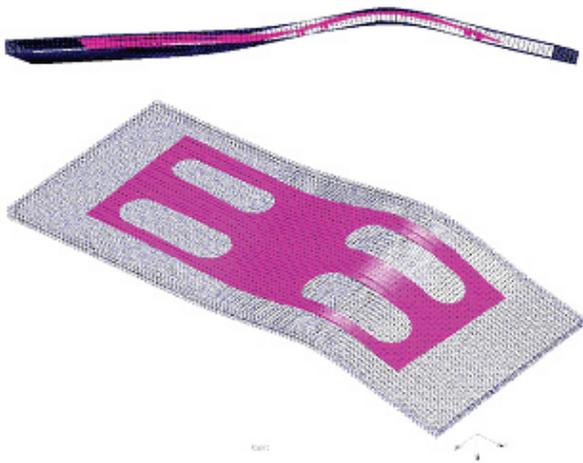


Рис. 11. Сопоставление формы плиты и формы целевого изделия

Fig. 11. Matching the shape of the plate and the shape of the target product

форма изделия полностью лежит внутри объема плиты, что указывает на возможность изготовления изделия даже при наличии неполного соответствия форм целевой плиты и плиты, полученной при моделировании.

Выводы

1. Ускоренным способом для сплавов В-1461, В95 с помощью усталостных испытаний определены и верифицированы предельные напряжения.
2. Испытаниями на усталость установлено, что формообразование плит из сплавов В-1461, В95 в режиме ползучести не ухудшает характеристики сопротивления усталостному разрушению образцов из этих полуфабрикатов.
3. Сравнительные испытания сплавов показали, что В-1461 имеет более высокие усталостные характеристики.
4. На фрактографии усталостного излома сплава В-1461 было показано появление черных точек – зон с повышенным содержанием кислорода. Деформация в этих зонах концентрации напряжения протекает с процессами окисления, что влияет на сопротивление усталостному разрушению.
5. Результат моделирования показал, что есть необходимость математической постановки обратной задачи формообразования панели, где параметрами функции оптимального деформирования будут координаты пуансонов относи-

тельно одного из углов плиты и перемещение пуансонов вдоль оси Z. При решении задачи необходимо учитывать упругий возврат панели и физическую нелинейность материала. Количественное сравнение форм двух тел, проведенное по вышеописанному алгоритму в программе MashLab, в дальнейшем позволит использовать результат сравнения в качестве критерия останова при решении последовательности прямых задач формообразования плиты.

Список литературы

1. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu для авиакосмической техники / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко, И.И. Молостова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2008. – № 8. – С. 17–21.
2. Оглодков М.С. Закономерности изменения структуры и свойств катаных полуфабрикатов из сплава В-1461 в зависимости от технологических параметров производства и термической обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 26 с.
3. Перспектива применения плит из высокопрочного сплава В-1461 пониженной плотности в самолетных конструкциях / Л.Б. Хохлатова, Н.И. Колобнев, М.С. Оглодков, А.А. Филатов, Ю.А. Попова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 2. – С. 16–22.
4. Изменение фазового состава в зависимости от режимов старения и структуры полуфабрикатов сплава В-1461 / Л.Б. Хохлатова, Н.И. Колобнев, М.С. Оглодков, Е.А. Лукина, С.В. Сбитнева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 6 (684). – С. 20–24.
5. К вопросу обработки материалов давлением в режиме ползучести / Б.В. Горев, И.Д. Клопотов, Г.А. Раевская, О.В. Соснин // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – Т. 21, № 5 (123). – С. 185–191.
6. Патент 2056197 Российская Федерация. Способ формообразования деталей и устройство для его осуществления / П.В. Миодушевский, Г.А. Раевская, О.В. Соснин. – № 5037750/08; заявл. 15.04.1992; опубл. 20.03.1996.
7. Патент 2251464 Российская Федерация. Устройство формования / И.Д. Клопотов, И.В. Любашевская, Г.А. Раевская, Л.Л. Рублевский, О.В. Соснин. – № 2002119982/02; заявл. 22.07.2002; опубл. 10.05.2005.
8. The influence of coating technologies on stress-strain characteristics of the sample at periodic loading / K.V. Zakharchenko, V.I. Kapustin, V.P. Zubkov,

A.V. Talanin, E.A. Maksimovski // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012032.

9. Raevskaya G.A., Zakharchenko K., Larichkin A. Determination of optimum parameters of the technological process for plates forming from V95 and V-1461 alloys in creep applied in aircrafts constructed by “Sukhoi design bureau” // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012078. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012078.

10. Физическое моделирование технологического процесса формообразования элементов конструкций из алюминиевого сплава В95 в условиях ползучести / А.Ю. Ларичкин, К.В. Захарченко, Б.В. Горев, В.И. Капустин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – P. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15.

11. Peterson R.E. Stress concentration factors. – New York: Wiley, 1974. – 235 p.

12. Influence of the creep ageing process on the fatigue properties of components from V95pchT2 (analog 7175T76) and V95ochT2 (analog 7475) aluminium alloys / A. Larichkin, K. Zakharchenko, B. Gorev, V. Kapustin, E. Maksimovskiy // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012050. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012050.

13. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Оглодков М.С. Влияние режимов изготовления листов из сплава В-1461 на кристаллографию структуры и анизотропию свойств // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 36–42. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-6-36-42.

14. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.

15. О возможности получения термостабильных высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu с наночастицами упрочнением / В.А. Троянов, А.Н. Уксусников, О.Г. Сенаторова, В.Г. Пушин // Вторые Московские чтения по проблемам прочности материалов, посвященные 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна: тезисы докладов. – М.; Черноголовка, 2011. – С. 152.

16. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов: синергетика в авиации. – Уфа: Монография, 2007. – 500 с.

17. Brown M.W., De los Rios E., Miller K.J. Environmentally assisted cracking // Proceedings ECF 12: Fracture from Defects. – Cradley Heath, 1998. – Vol. 3. – P. 1091–1248.

18. Corrosion fatigue // Fatigue '99: Proceedings 7th International Fatigue Congress / ed. by X.R. Wu and Z.G. Wang). – Beijing, China, 1999. – Vol. 4. – P. 2197–2365.

19. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии / С.Н. Коробейников, А.И. Олейников, Б.В. Горев, К.С. Бормотин // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 346–365.

20. Бормотин К.С., Вин А. Метод динамического программирования в задачах оптимального деформирования панели в режиме ползучести // Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 470–478. – DOI: 10.26089/NumMet.v19r442.

21. Large creep formability and strength–ductility synergy enabled by engineering dislocations in aluminum alloys / Ch. Liu, J. Yang, P. Ma, Z. Ma, L. Zhan, K. Chen, M. Huang, J. Li, Zh. Li // International Journal of Plasticity. – 2020. – P. 102774.

22. Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy / Y.C. Lin, Y.-Q. Jiang, X.-M. Chen, D.-X. Wen, H.-M. Zhou // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 588. – P. 347–356. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.09.045.

23. Effects of creep-aging parameters on aging precipitates of a two-stage creep-aged Al-Zn-Mg-Cu alloy under the extra compressive stress / Y.C. Lin, X.-B. Peng, Y.-Q. Jiang, C.-J. Shuai // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 743. – P. 448–455. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.238.

24. Бормотин К.С., Белых С.В., Вин А. Математическое моделирование обратных задач многоточечного формообразования в режиме ползучести с помощью реконфигурируемого устройства // Вычислительные методы и программирование. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 258–267. – DOI: 10.26089/NumMet.v17r324.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Influence of Technology of Hot Forming of Plates from Aluminum Alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on Resistance to Fatigue Fracture

Kirill Zakharchenko^{1, 2, a, *}, Vladimir Kapustin^{2, 1, b}, Alexey Larichkin^{1, 3, c}, Yaroslav Lukyanov^{1, d}

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Lavrentieva Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2626-6184>,  zaharchenkok@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6124-2503>,  macler06@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7306-9522>,  larichking@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4526-9399>,  lukyanov@hydro.nsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 August 2020

Revised: 26 August 2020

Accepted: 14 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Aluminum-lithium alloy

Elastoplastic strain

Strain characteristics

Creep

Shaping

Structure

Accelerated method to evaluate metal

fatigue resistance

Finite element method

Funding

The reported study was funded by RFBR and Novosibirsk region according to the research project № 19-48-543028.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the leading process engineer of the branch of PJSC "Company "Sukhoi" "VP Chkalov Novosibirsk Aircraft Plant", Ph.D. (Engineering) Galina Raevskaya for consultations in the work.

ABSTRACT

Introduction. One of the primary objectives in the development of promising aircraft products is to reduce the weight of the aircraft structure. This problem can be solved by applying new low density materials such as aluminum alloys alloyed with lithium (for example, Al-Cu-Li-Zn) in the design of parts. The use of these materials in aircraft construction is limited by the processing technology, which must be such as not to damage the material and not reduce its strength properties. Such technologies include pressure processing with heating, when creep processes are activated and the material passes into a state close to superplasticity. **The purpose of the work:** assessment of the effect of pressure shaping of aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu in creep mode on strength. **The paper investigates** the influence of the technology of pressure shaping of aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on the resistance to fatigue failure. The work uses a **method** that allows to determine the ultimate stresses using diagrams of the accumulation of irreversible deformations; method of forming thick plates (40 mm) in the creep mode. The previously selected optimum temperatures for forming the plates are used. A non-contact coordinate measuring system is used to perform surface inspection after shaping. Fractography of the fracture of samples of alloy Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu after fatigue failure is performed. Mathematical modeling of the deformation process of plates in creep mode is carried out in the MSC.Marc package. **As a result**, a conservative evaluation of the endurance limit for aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu is obtained. The shaping of thick plates in the creep mode is carried out. More than 80% of the board surface is formed with a deviation of less than 1 mm from the target size. Fatigue tests of samples made of molded panels of alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu are carried out, fatigue curves are plotted. The fractography of the surface of the fatigue fracture showed the presence of oxides in the samples of alloy Al-Cu-Li-Zn, in contrast to alloy Al-Zn-Mg-Cu. **The results of fatigue tests are discussed**, showing that the characteristics of the technological process of shaping and heat treatment do not deteriorate the fatigue properties of the investigated alloys. Comparative tests show that alloy Al-Cu-Li-Zn has higher fatigue characteristics. Mathematical modeling show that the use of the Boyle-Norton steady-state creep law is not enough to describe the process of plate forming. The necessity of setting the inverse problem of creep age forming is noted, where the coordinates of the punches of the loading device should act as boundary conditions.

For citation: Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Larichkin A.Yu., Lukyanov Ya.L. Influence of technology of hot forming of plates from aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on resistance to fatigue fracture. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 94–109. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-94-109. (In Russian).

* Corresponding author

Zakharchenko Kirill V., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 (383) 346-17-64, **e-mail:** zaharchenkok@mail.ru

References

1. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Molostova I.I. Razvitie i primeneniye vysokoprochnykh splavov sistemy Al-Zn-Mg-Cu dlya aviakosmicheskoi tekhniki [Development and application of high-strength alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system for aircraft engineering]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference book*, 2008, no. 8, pp. 17–21.
2. Oglodkov M.S. *Zakonomernosti izmeneniya struktury i svoystv katanykh polufabrikatov iz splava V-1461 v zavisimosti ot tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva i termicheskoi obrabotki*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Regularities of alteration structure and properties of rolled semi-finished products from alloy V-1461, depending on technological parameters of production and heat treatment. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2013. 26 p.
3. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Filatov A.A., Popova Yu.A. Perspektiva primeneniya plit iz vysokoprochnogo splava V-1461 ponizhennoi plotnosti v samoletnykh konstruksiyakh [The prospect of using slabs of high-strength alloy B-1461 of reduced density in aircraft structures]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference book*, 2014, no. 2, pp. 16–22.
4. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Lukina E.A., Sbitneva S.V. Izmeneniye fazovogo sostava v zavisimosti ot rezhimov stareniya i struktury polufabrikatov splava V-1461 [Variation of phase composition as a function of the mode of aging and structure of semiproducts from alloy V-1461]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2012, no. 6, pp. 20–24. (In Russian).
5. Gorev B.V., Klopotov I.D., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. K voprosu obrabotki materialov davleniem v rezhime polzuchesti [To the problem of processing of materials by pressure in the creep mode]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Applied mechanics and technical physics*, 1980, no. 5, pp. 185–191. (In Russian).
6. Miodushevskij P.V., Raevskaja G.A., Sosnin O.V. *Sposob formoobrazovaniya detalei i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of shaping parts and apparatus for performing the method]. Patent RF, no. 2056197, 1996.
7. Klopotov I.D., Lyubashevskaya I.V., Raevskaya G.A., Rublevsky L.L., Sosnin O.V. *Ustroystvo formovaniya* [Molding device]. Patent RF, no. 2251464, 2005.
8. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Zubkov V.P., Talanin A.V., Maksimovski E.A. The influence of coating technologies on stress-strain characteristics of the sample at periodic loading. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012032.
9. Raevskaya G.A., Zakharchenko K., Larichkin A. Determination of optimum parameters of the technological process for plates forming from V95 and V-1461 alloys in creep applied in aircrafts constructed by “Sukhoi design bureau”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012078. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012078.
10. Larichkin A.Yu., Zakharchenko K.V., Gorev B.V., Kapustin V.I. Fizicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskogo protsessa formoobrazovaniya elementov konstruksiy iz alyuminiyevogo splava B95 v usloviyakh polzuchesti [Experimental modeling of technological process of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) structural elements forming under creep]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15.
11. Peterson R.E. *Stress concentration factors*. New York, Wiley, 1974. 235 p.
12. Larichkin A., Zakharchenko K., Gorev B., Kapustin V., Maksimovskiy E. Influence of the creep ageing process on the fatigue properties of components from V95pchT2 (analog 7175T76) and V95ochT2 (analog 7475) aluminium alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012050.
13. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Oglodkov M.S. Vliyaniye rezhimov izgotovleniya listov iz splava V-1461 na kristallografiyu struktury i anizotropiyu svoystv [The influence of fabrication modes of sheets of V-1461 alloy on the structure crystallography and anisotropy of properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*, 2015, no. 6, pp. 36–42. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-6-36-42.
14. Kishkina S.I. *Soprotivleniye razrusheniyyu alyuminiyevykh splavov* [Fracture resistance of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 280 p.
15. Troyanov V.A., Uksusnikov A.N., Senatorova O.G., Pushin V.G. [About the possibility of obtaining thermostable high-strength alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system with nano-phase separation]. *Vtorye Moskovskie chteniya po problemam prochnosti materialov, posvyashchennye 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAN Yu.A. Osip'yana: tezisy dokladov* [Proceedings Second Moscow Readings on the Problems of Strength of Materials,

dedicated to the 80th anniversary of the birth of Academician Yu.A. Osipyan. Abstracts]. Moscow, Chernogolovka, 2011, p. 152. (In Russian).

16. Shanyavskii A.A. *Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov: sinergetika v aviatsii* [Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation]. Ufa, Monografiya Publ., 2007. 500 p.

17. Brown M.W., De los Rios E., Miller K.J. Environmentally assisted cracking. *Proceedings ECF 12: Fracture from Defects*, Cradley Heath, 1998, vol. 3, pp. 1091–1248.

18. Wu X.R., Wang Z.G., eds. Corrosion fatigue. *Fatigue '99: Proceedings 7th International Fatigue Congress*, Beijing, China, 1999, vol. 4, pp. 2197–2365.

19. Korobeinikov S., Oleinikov A., Gorev B., Bormotin K. Matematicheskoe modelirovanie protsessov polzuchesti metallicheskikh izdelii iz materialov, imeyushchikh raznye svoystva pri rastyazhenii i szhatii [Mathematical simulation of creep processes in metal patterns made of materials with different extension/compression properties]. *Vychislitel'nye metody i programirovanie = Numerical Methods and Programming*, 2008, vol. 9, no. 1, pp. 346–365.

20. Bormotin K.S., Vin A. Metod dinamicheskogo programmirovaniya v zadachakh optimal'nogo deformirovaniya paneli v rezhime polzuchesti [A method of dynamic programming in the problems of optimal panel deformation in the creep mode]. *Vychislitel'nye metody i programirovanie = Numerical Methods and Programming*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 470–478. DOI: 10.26089/NumMet.v19r442.

21. Liu Ch., Yang J., Ma P., Ma Z., Zhan L., Chen K., Huang M., Li J., Li Zh. Large creep formability and strength–ductility synergy enabled by engineering dislocations in aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*, 2020, p. 102774.

22. Lin Y.C., Jiang Y.-Q., Chen X.-M., Wen D.-X., Zhou H.-M. Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 588, pp. 347–356. DOI: 10.1016/j.msea.2013.09.045.

23. Lin Y.C., Peng X.-B., Jiang Y.-Q., Shuai C.-J. Effects of creep-aging parameters on aging precipitates of a two-stage creep-aged Al–Zn–Mg–Cu alloy under the extra compressive stress. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 743, pp. 448–455. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.238.

24. Bormotin K.S., Belykh S.V., Vin A. Matematicheskoe modelirovanie obratnykh zadach mnogochechnogo formoobrazovaniya v rezhime polzuchesti s pomoshch'yu rekonfiguriruemogo ustroystva [Mathematical modeling of inverse multipoint forming problems in the creep mode using a reconfigurable tool]. *Vychislitel'nye metody i programirovanie = Numerical Methods and Programming*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 258–267. DOI: 10.26089/NumMet.v17r324.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние режима сварки трением с перемешиванием и ее направления относительно направления прокатки сплава Д16 на структуру и свойства его сварных соединений

Алексей Иванов^{1, 2, a, *}, Валерий Рубцов^{1, 2, b}, Евгений Колубаев^{1, 2, c}, Владимир Бакшаев^{3, d}, Иван Ивашкин^{3, e}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», ул. Ленинградская, 36, г. Чебоксары, 428021, Чувашская Республика, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>, ivan@ispms.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>, bakshaeva@mail.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0001-8808-2183>, ivashkin_in@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14:620.172.242

История статьи:

Поступила: 01 сентября 2020

Рецензирование: 09 сентября 2020

Принята к печати: 17 сентября 2020

Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
 Параметры режима сварки
 Направление прокатки
 Алюминиевый сплав

Финансирование:

Работа выполнена в рамках комплексного проекта «Создание производства высокотехнологичного крупногабаритного оборудования интеллектуальной адаптивной сварки трением с перемешиванием для авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 22.11.2019 № 075-11-2019-033), реализуемого ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», НГТУ и ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

АННОТАЦИЯ

Введение. Режим сварки трением с перемешиванием определяет характер термомеханического воздействия на свариваемый материал, поэтому критическое изменение даже одного из параметров режима может привести к формированию дефектов и снижению прочности сварного соединения. Немаловажным фактором также является ориентация свариваемого материала относительно направления сварки, поскольку она определяет кинетику деформирования материала и, как следствие, результирующую структуру и свойства. Исследования процессов сварки трением с перемешиванием в основном заключаются в анализе конечных свойств получаемых сварных соединений и их сопоставлении с параметрами режима сварки. Но для решения задачи получения прочных и качественных сварных соединений немаловажной также является оценка сопротивления материала деформированию от воздействия сварочного инструмента, что достигается мониторингом ряда параметров непосредственно в процессе сварки. **Целью работы является** исследование влияния параметров режима сварки и ориентации структуры свариваемого материала на протекание процесса сварки трением с перемешиванием, а также на структуру и прочность получаемых сварных соединений алюминиевого сплава Д16. **Результаты и обсуждение.** Посредством мониторинга крутящего момента и усилия сварки показано, что при повышении усилия внедрения инструмента сопротивление материала деформированию повышается. При сварке поперек направления прокатки исходного материала параметры крутящего момента и усилия сварки снижаются на 5...20 %. Повышение скорости сварки обеспечивает рост сопротивления материала перемещению инструмента, при этом направление сварки не оказывает значительного влияния. С повышением частоты вращения инструмента сопротивление материала деформированию снижается, а температура сварки повышается, что приводит к повышению степени пластификации материала и улучшению условий его массопереноса. Также показано, что режим сварки, позволяющий вести сварку сплава Д16 при температуре 450...500 °С, обеспечивает степень пластификации материала, при которой получаются сварные соединения с качественной структурой и высокими механическими свойствами. В этих условиях направление сварки относительно направления прокатки исходного материала оказывает влияние: при сварке вдоль направления прокатки предел прочности соединения достигает значения 92 %, а при сварке поперек – 95 % от предела прочности исходного материала.

Для цитирования: Влияние режима сварки трением с перемешиванием и ее направления относительно направления прокатки сплава Д16 на структуру и свойства его сварных соединений / А.Н. Иванов, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, В.А. Бакшаев, И.Н. Ивашкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 110–123. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-110-123.

*Адрес для переписки

Иванов Алексей Николаевич, к.т.н., научный сотрудник
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: +7 (382) 228-68-63, e-mail: ivan@ispms.ru

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является процессом сварки давлением, в ходе которого под воздействием вращающегося инструмента происходит деформация, фрикционный разогрев, пластическое течение материала и его перенос между свариваемыми заготовками [1]. Температура разогрева материала в процессе СТП ниже температуры его плавления, что открывает широкие производственные возможности сварки промышленных трудосвариваемых материалов, к примеру, термоупрочняемых алюминиевых сплавов.

Сочетание параметров режима СТП определяет характер термомеханического воздействия на свариваемый материал, поэтому критическое изменение даже одного из параметров может привести к формированию дефектов и снижению прочности сварного соединения [2, 3]. Немаловажным фактором также является ориентация свариваемого материала относительно направления сварки, поскольку деформация и размер его исходного структурного зерна, сформированного прокаткой, определяет кинетику деформирования материала и, как следствие, результирующую структуру и свойства [4].

В месте наибольшего воздействия инструмента, называемом зоной перемешивания (ЗП), возникает процесс интенсивной пластической деформации свариваемого материала [5, 6], который обуславливает измельчение его исходного зерна с повышением числа высокоугловых границ [7, 8]. В деформируемых алюминиевых сплавах прочность ЗП сварного соединения напрямую связана с ростом протяженности границ зерен, согласно механизму Холла – Петча [9]. На примере фрикционной обработки деформируемого алюминиевого сплава системы AlMg показано, что этот механизм обуславливает повышение прочности деформированного материала в ЗП относительно исходного проката [10]. В прилегающей к ЗП зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ) обычно наблюдается значительная деформация структурных зерен материала, снижение их среднего размера с повышением числа малоугловых границ [11], поэтому ее граница с ЗП, имеющая резкий переход от одного типа структуры к другому, часто характеризуется разупрочнением материала.

Дополнительным фактором, влияющим на прочность сварных соединений термоупрочняемых алюминиевых сплавов, является характерный для них механизм дисперсионного упрочнения [12–14]. При СТП таких сплавов в результате воздействия инструмента происходит динамическая рекристаллизация, которой сопутствует растворение, повторное выделение и перераспределение упрочняющих фаз, что может привести к снижению прочности материала сварного соединения [15–18].

На сегодняшний день исследования процессов СТП в основном заключаются в анализе конечных свойств получаемых сварных соединений и их сопоставлении с параметрами режима сварки: усилием внедрения инструмента, его частотой вращения и скоростью перемещения [19, 20]. Но для решения задачи получения прочных и качественных сварных соединений немаловажной также является оценка сопротивления материала деформированию от воздействия сварочного инструмента, что достигается мониторингом ряда параметров непосредственно в процессе сварки.

Исходя из этого, **целью работы является** исследование влияния параметров режима сварки и ориентации структуры свариваемого материала на протекание процесса сварки трением с перемешиванием, а также на структуру и прочность получаемых сварных соединений алюминиевого сплава Д16.

Методика исследований

Исследуемые в работе сварные соединения получали из листовых заготовок термоупрочняемого сплава Д16. Химический состав исходного сплава исследовали при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton 3xlt Goldd+. По данным анализа, сплав имеет следующий состав: Cu 4,8 вес. %; Mg 1,3 вес. %; Mn 0,5 вес. %; Fe 0,3 вес. %; Si 0,1 вес. %; Ti 0,1 вес. %; Zn 0,1 вес. %; Al остальное. Заготовки под сварку вырезали в виде пластин толщиной 2,5 мм с размерами 60×250 мм вдоль и поперек направления прокатки исходного материала. Лицевая часть заготовок в месте под сварку была обработана механически со снятием слоя материала до толщины 2,0 мм. Свариваемые кромки были обработаны механически для обеспечения их без-

зазорного прилегания друг к другу и удаления оксидного слоя.

Сварку трением с перемешиванием сварных соединений выполняли в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН на оборудовании для СТП (рис. 1, а). В процессе СТП проводился тепловизионный контроль (ТК) температурного поля на поверхности заготовок за инструментом посредством съемки в режиме реального времени при помощи тепловизора Flir A655sc (рис. 1, б). Сварка выполнялась с использованием шести технологических режимов, приведенных в таблице, с параметрами, варьируемыми таким образом, чтобы повысить ин-

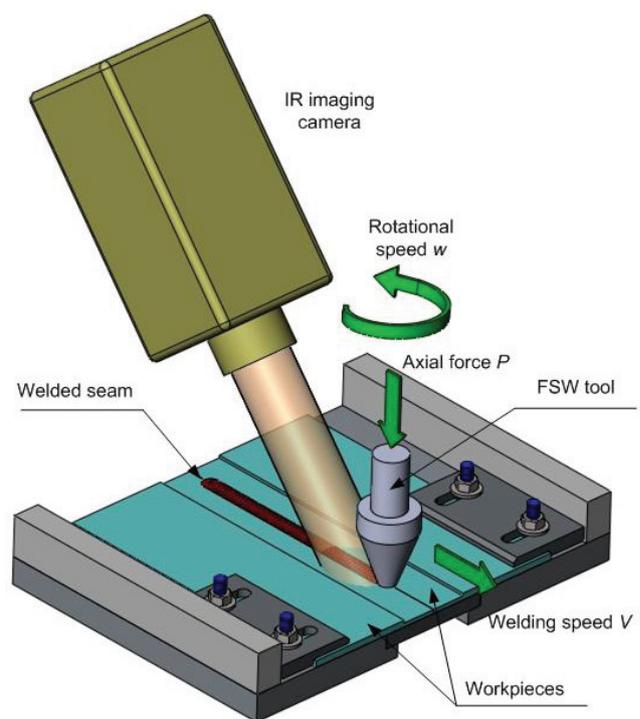
тенсивность термомеханического воздействия при переходе от одного режима к другому. Для каждого режима были получены сварные соединения протяженностью 75 мм.

В процессе сварки в режиме реального времени средствами оборудования для СТП производился мониторинг параметров воздействия свариваемого материала на сварочный инструмент: крутящего момента на шпинделе и усилия сварки.

После сварки полученные соединения кондиционировались при нормальных условиях в течение 72 ч, затем электроэрозионным способом поперек соединений вырезались образцы для



а



б

Рис. 1. Оборудование для СТП (а) и схема используемых процессов сварки и тепловизионного контроля (б)

Fig. 1. The FSW equipment (а) and a schematics of welding and heat monitoring processes that are used (б)

Режимы СТП Conditions of FSW

Параметр СТП / FSW parameter	Режим / Condition					
	1	2	3	4	5	6
P , кН / P , kN	8,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
V , мм/мин / V , mm/min	200	200	300	300	350	400
ω , об/мин / ω , rpm	800	800	800	800	900	1000

испытаний на одноосное растяжение таким образом, чтобы сварное соединение располагалось в центре рабочей части образца. При вырезке образцов сварные соединения были условно поделены по протяженности на три участка: 0...25, 25...50 и 50...75 мм. Образцы для испытаний вырезались на каждом из указанных участков соединений. Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине УТС-110М-100 со скоростью деформации 10 мм/мин. Для металлографических исследований электроэрозионным способом вырезались шлифы с их последующим полированием и травлением. Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе «Альтами МЕТ 1С».

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены графики крутящего момента на шпинделе в процессе СТП по режимам 1–6 с начала внедрения инструмента в матери-

ал свариваемых заготовок до прекращения его перемещения вдоль свариваемых кромок. Соответствующие графики усилия сварки приведены на рис. 3. При сварке по режиму 1 внедрение инструмента является самым продолжительным, что связано с невысоким значением осевого усилия P , равным 8,0 кН. После внедрения инструмента и перед началом процесса сварки наблюдается снижение величины крутящего момента (рис. 2, кривые 1). Это свидетельствует о том, что в результате продолжительного внедрения плечи инструмента не оказывают значительного влияния на пластификацию материала, поскольку он уже пластифицирован стержнем инструмента. Величины крутящего момента при сварке вдоль направления прокатки материала превышают величины момента при сварке поперек направления прокатки на величину 5...12%. Значения усилий сварки (рис. 3, кривые 1) при сварке вдоль направления прокатки превышают величины усилий при сварке поперек направления прокатки на величину 5...20%. Разница в

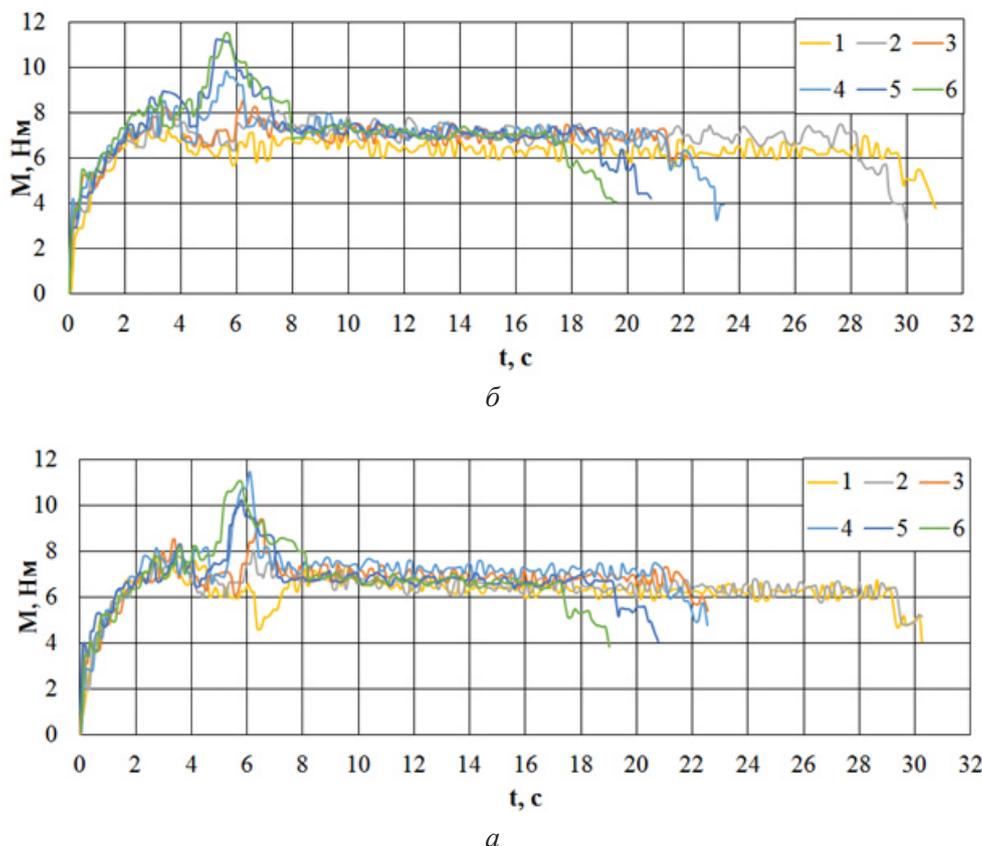


Рис. 2. Крутящий момент на сварочном шпинделе в процессе СТП: вдоль (а) и поперек (б) направления прокатки исходного материала

Fig. 2. Welding spindle torque during FSW process: longitudinally (a) and transversely (b) to the direction of base metal rolling

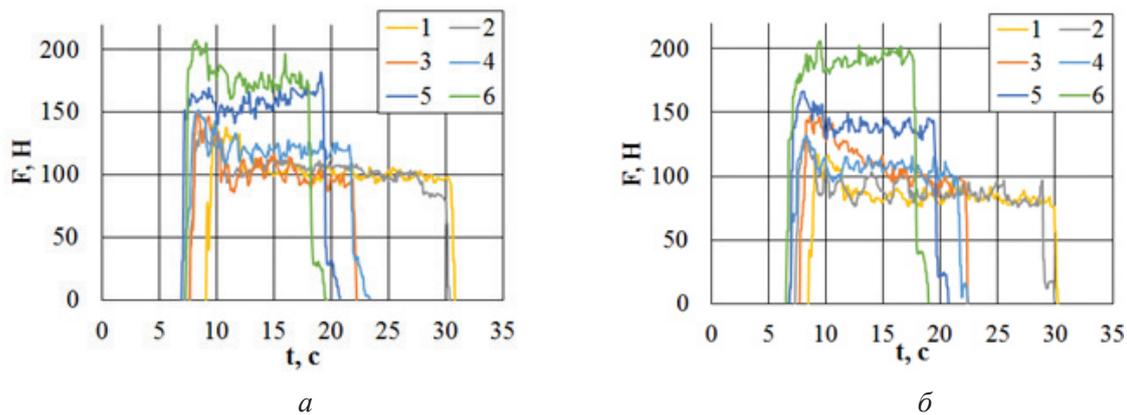


Рис. 3. Усилие сварки в процессе СТП: вдоль (а) и поперек (б) направления прокатки исходного материала

Fig. 3. Welding force during FSW process: longitudinally (а) and transversely (б) to the direction of base metal rolling

значениях моментов и усилий объясняется меньшим размером зерна в поперечном направлении прокатки материала и, следовательно, меньшим значением усилий, требуемых для его деформирования.

При сварке по режиму 2 усилие внедрения инструмента P было повышено до 10,0 кН, при этом внедрение инструмента происходило быстрее, поэтому снижения крутящего момента как при режиме 1 (рис. 2, кривые 2) не наблюдалось. Величина моментов относительно режима 1 возросла на 5...15 %, при этом соотношение между значениями моментов при сварке вдоль и поперек направления прокатки сохранилось. Усилия сварки для режимов 1 и 2 сопоставимы между собой, а соотношение между значениями усилий при сварке вдоль и поперек направления прокатки сохранилось (рис. 3, кривые 2). Повышение величины момента связано с ростом сопротивления материала заготовки воздействию плечевой части инструмента, а сохранение значений усилия сварки – с сохранением величины скорости перемещения инструмента.

При сварке по режиму 3 повышение усилия внедрения P до 11,0 кН привело к увеличению сопротивления материала деформированию от вращения инструмента в начале сварки, что выражается появлением характерного пика на графиках моментов (рис. 2, кривые 3). Повышение скорости сварки V до 300 мм/мин привело к росту усилия сварки в начале процесса СТП. Относительно режима 2 величины моментов возросли на величину до 10 %, а усилия сварки – на величину до 30 % (рис. 3, кривые 3). Рост усилий

сварки определяется увеличением ее скорости, при котором сопротивление материала перемещению инструмента определяется условиями нагрева материала и практически не зависит от ориентации его структурного зерна относительно направления сварки. Это также подтверждается различием в величинах моментов и усилий при сварке вдоль и поперек направления прокатки материала менее 5 %.

Дальнейшее повышение усилия внедрения инструмента P до 12,0 кН при прочих неизменных параметрах (режим 4) обеспечило рост крутящего момента в начале процесса сварки (рис. 2, кривые 4), однако в дальнейшем не привело к существенным изменениям показателей крутящего момента и усилия сварки, значения которых сопоставимы со значениями режима 3 (рис. 3, кривые 4).

При сварке по режиму 5, несмотря на повышение усилия внедрения инструмента P до 13,0 кН, значения крутящего момента снизились на 5...10 % относительно значений при режиме 4 сварки (рис. 2, кривые 5). Снижение момента обусловлено ростом частоты вращения инструмента ω до 900 об/мин, что в сочетании с повышением усилия внедрения повышает пластичность материала и скорость его деформирования инструментом. Значения усилий сварки увеличились на величину 15...20 % относительно значений при режиме 4 (рис. 3, кривые 5). Рост усилий сварки обусловлен повышением ее скорости V до 350 об/мин, при котором материал перед инструментом не разогревается до необходимого состояния пластичности. При сварке

поперек зерен свариваемого материала наблюдается снижение величины крутящего момента и усилия сварки, что, по-видимому, связано с ориентацией зерен относительно направления сварки. Схожие эффекты отмечены и при выполнении сварки по режиму 6 (рис. 2, 3, кривые б).

На рис. 4 приведена макроструктура исследуемых сварных соединений в поперечном сечении. На изображениях видно, что в материале всех исследуемых сварных соединений выделяется зона перемешивания (SZ) и граничащая с ней зона термомеханического воздействия (ТМАЗ), а также отсутствуют видимые структурные дефекты, что означает отсутствие в режимах сварки 1–6 критических значений параметров. В зоне SZ соединений, полученных по режимам 1–3, видны кольцевые структурные образования, так называемые onion rings [21].

При повышении интенсивности термомеханического воздействия (режимы 4–6) эти образования становятся менее выраженными. На рис. 5 приведена микроструктура зон SZ и ТМАЗ соединений, полученных по режимам 1 и 6, в которых четко просматривается ориентированность деформирования материала, обусловленная его взаимодействием с инструментом. При режиме сварки 1 она является более выраженной.

При проведении тепловизионного контроля были получены температурные профили процессов СТП по режимам 1–6 (рис. 6). Анализ профилей показал, что при режимах 1–2 с низкой интенсивностью термомеханического воздействия процесс сварки начинается при температуре 350...380 °С и завершается при температуре 400...420 °С. С повышением скорости сварки и усилия внедрения инструмента при режимах

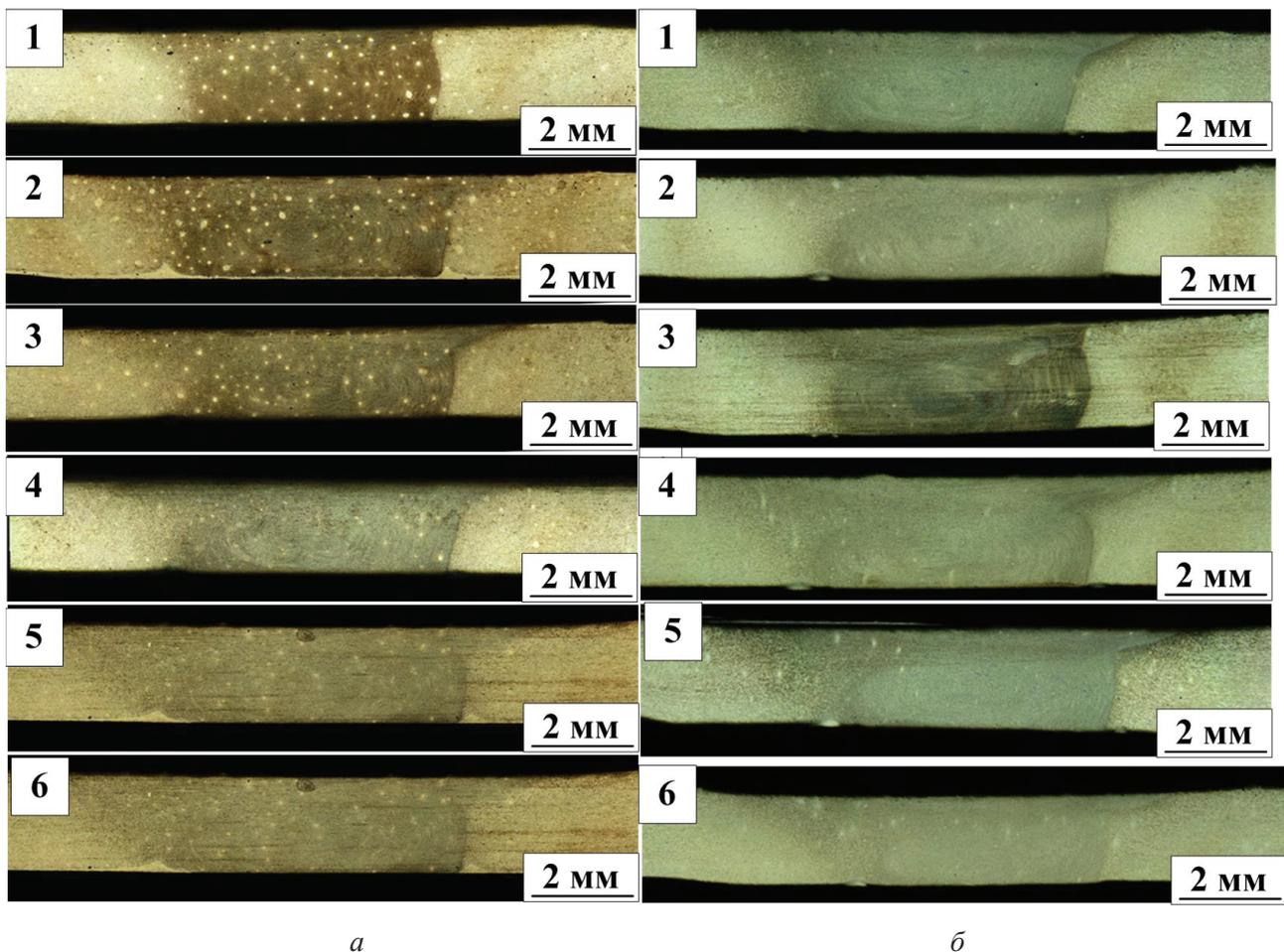


Рис. 4. Макроструктура сварных соединений, сваренных по режимам 1–6 вдоль (а) и поперек (б) направления прокатки исходного материала

Fig. 4. Macrostructure of joints that are welded in conditions 1–6 longitudinally (a) and transversely (б) to the direction of base metal rolling

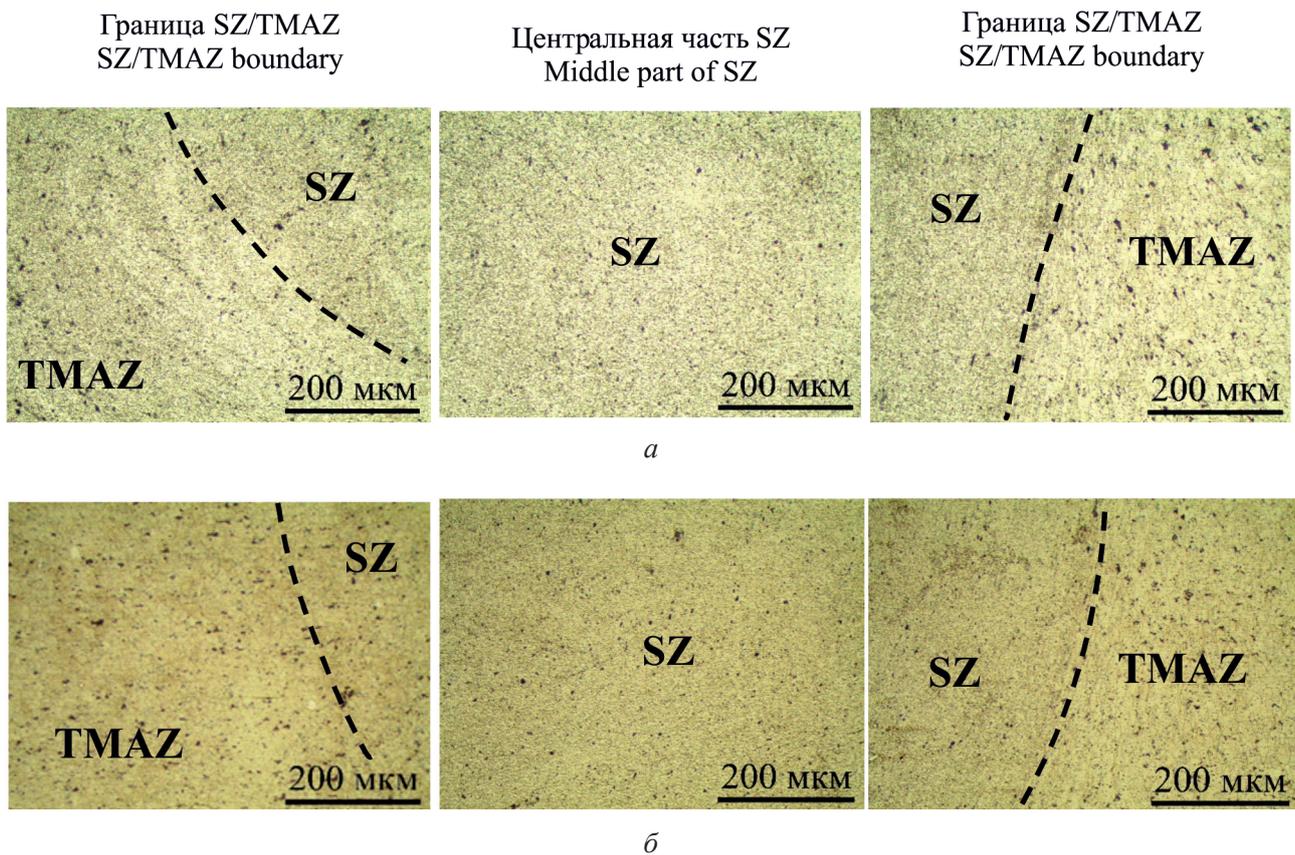


Рис. 5. Микроструктура SZ и границ SZ/TMAZ сварных соединений, сваренных вдоль направления прокатки исходного материала по режимам 1 (а) и 6 (б)

Fig. 5. Microstructure of SZ and SZ/TMAZ boundaries of joints that are welded longitudinally to the direction of base metal rolling in conditions 1 (a) and 6 (б)

3–4 температура начала процесса возрастает до величин 380...400 °С, а температура завершения – до 460...470 °С. Разница температур начала и конца процесса сварки объясняется постепенным накоплением тепла в свариваемом материале, которое вносит свой вклад в температурный режим СТП. Следует отметить, что кривые профиля режимов 1–4 имеют форму, указывающую на колебания температуры во время сварки, которые характеризуются большими величинами амплитуды и периода. В сочетании с наличием onion rings в структуре соединения (рис. 4) это позволяет сделать вывод о недостаточной степени пластификации материала при указанных режимах сварки.

При повышении интенсивности термомеханического воздействия (режимы 5–6) температура начала сварки составляет 400–450 °С, а при завершении она достигает значений 500–510 °С. Следует отметить снижение периода и амплитуды колебаний температуры на кривых температурных профилей, а также устранение onion

rings в структуре соединений. Исходя из этого, можно сделать вывод о достаточной степени пластификации материала при температуре процесса СТП в диапазоне 450...500 °С. Кроме того, можно сделать вывод о приближении режимов 5–6 к некоему оптимальному режиму сварки, позволяющему получить сварное соединение с качественной структурой и высокими прочностными характеристиками. Также следует отметить, что процесс сварки поперек направления прокатки исходного материала в среднем характеризуется температурой на 10...20 °С выше, чем процесс сварки вдоль направления прокатки.

На рис. 7 приведены результаты испытаний на одноосное растяжение экспериментальных образцов, полученных на трех участках (0...25, 25...50 и 50...75 мм), на протяженности исследуемых сварных соединений и соответствующие им значения параметров процесса СТП: крутящего момента, усилия сварки и температуры материала за инструментом.

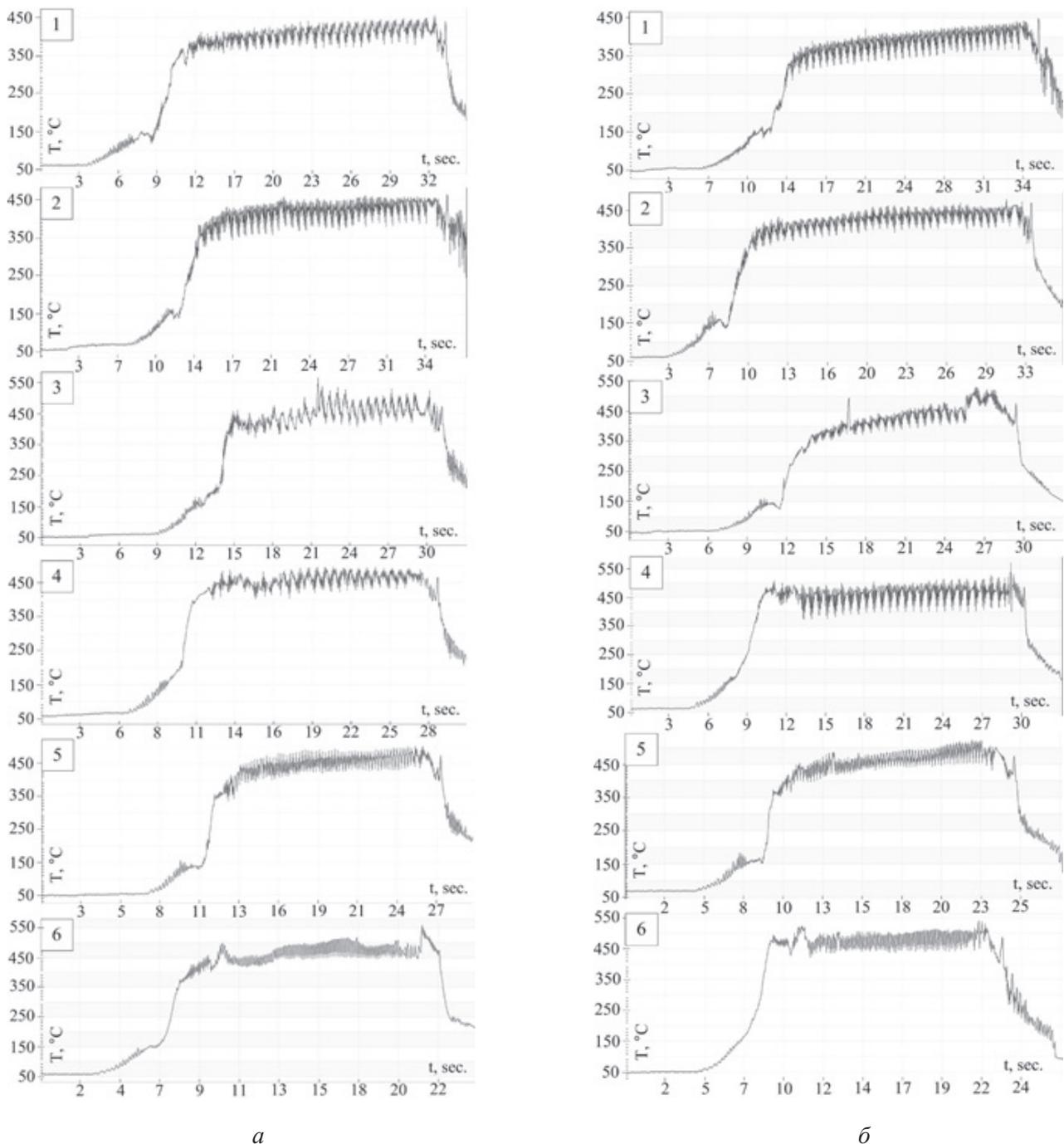


Рис. 6. Температурные профили СТП по режимам 1–6 вдоль (а) и поперек (б) направления прокатки исходного материала

Fig. 6. Thermal profiles of FSW in conditions 1–6 longitudinally (а) and transversely (б) to the direction of base metal rolling

Для сварных соединений в направлении вдоль и поперек прокатки исходного материала наблюдается повышение прочностных характеристик с повышением интенсивности термомеханического воздействия в процессе СТП. При сварке вдоль направления прокатки последовательное повышение параметров режима позволило достичь значений предела прочности 92 % от предела прочности исходного материала.

Соответствующее соотношение для материала сварных соединений, получаемых поперек направления прокатки, составило 95 %. При этом с повышением температуры процесса (на участке 50...75 мм соединений) наблюдается снижение крутящего момента, что свидетельствует о лучшей пластификации материала. Как следствие, повышается эффективность процесса его массопереноса и формируется более равновесная

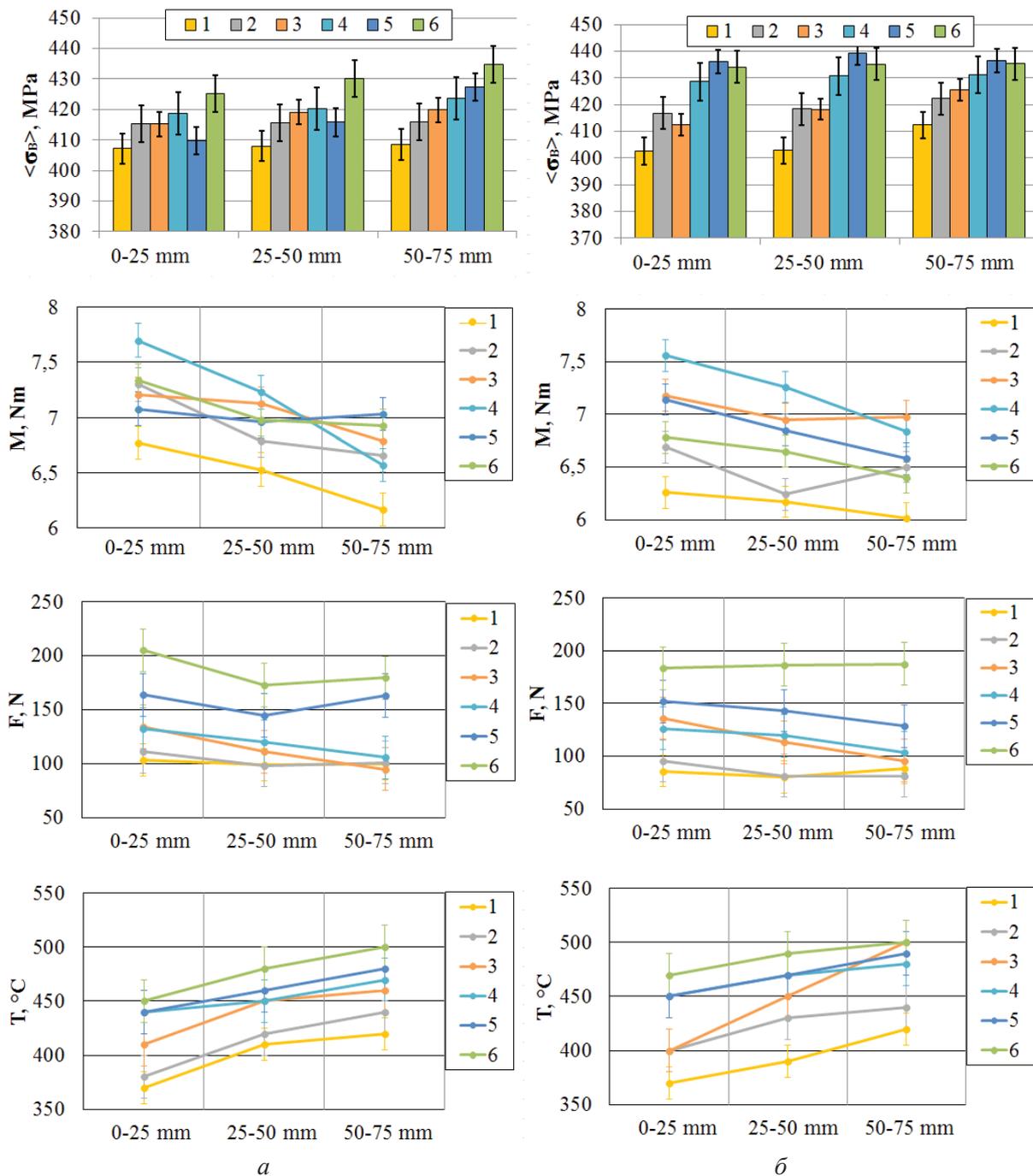


Рис. 7. Предел прочности участков сварных соединений и соответствующие значения параметров процесса СТП по режимам 1–6 вдоль (а) и поперек (б) направления прокатки исходного материала

Fig. 7. Tensile strength of welded joints and corresponding values of parameters FSW process in conditions 1–6 longitudinally (a) and transversely (b) to the direction of base metal rolling

структура, обладающая большими прочностными свойствами. Сравнение величин параметров процесса СТП при режимах 5–6, обеспечивающих наибольшие значения предела прочности, показывает, что процесс СТП в направлении поперек прокатки исходного материала протекает более эффективно.

Заключение

Посредством мониторинга в процессе СТП показано сопротивление свариваемого материала термомеханическому воздействию от сварочного инструмента путем оценки величин крутящего момента и усилия сварки. При увеличении

усилия внедрения инструмента эти параметры повышаются в результате роста сопротивления материала деформированию. При СТП поперек направления прокатки исходного материала параметры крутящего момента и усилия сварки снижаются на величину 5...20 %. При данных условиях повышение скорости сварки обеспечивает рост сопротивления материала перемещению инструмента, причем направление сварки не оказывает значительного влияния. При этом с повышением частоты вращения инструмента сопротивление материала деформированию снижается, а температура сварки повышается, что приводит к повышению степени пластификации материала и улучшению условий его массопереноса. Это подтверждается данными тепловизионного контроля, согласно которым повышение интенсивности термомеханического воздействия за счет совокупного повышения параметров режима сварки приводит к повышению температуры процесса СТП со снижением ее колебаний.

Также показано, что повышение параметров режима, позволяющее вести СТП сплава Д16 при температуре 450...500 °С, обеспечивает степень пластификации материала, при которой получают сварные соединения с качественной структурой и высокими механическими свойствами. В этих условиях направление сварки относительно направления прокатки исходного материала оказывает влияние: при сварке вдоль направления прокатки предел прочности соединения достигает значения 92 %, а при сварке поперек – 95 % от предела прочности исходного материала.

Список литературы

1. On material flow in friction stir welded Al alloys / A. Tougne, C. Desrayand, M. Jahazi, E. Feulvach // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 239. – P. 284–296. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.030.
2. Овчинников В.В., Дриц А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al-Mg // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2019. – № 3. – С. 7–20. – DOI: 10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899.
3. Podržaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding // *Metalurgija*. – 2015. – Vol. 54, iss. 2. – P. 387–389.

4. On the similarity of deformation mechanisms during friction stir welding and sliding friction of the AA5056 alloy / A. Kolubaev, A. Zaikina, O. Sizova, K. Ivanov, A. Filippov, E. Kolubaev // *Russian Physics Journal*. – 2018. – Vol. 60 (12). – P. 2123–2129. – DOI: 10.1007/s11182-018-1335-4.
5. Defects formation during friction stir welding: a review / N. Soni, S. Chandrashekhara, A. Kumar, V.R. Chary // *International Journal of Engineering and Management Research*. – 2017. – Vol. 7, iss. 3. – P. 121–125. – DOI: 10.13140/RG.2.2.19381.93921.
6. Upgrading weld quality of a friction stir welded aluminum alloys AMG6 / I.K. Chernykh, E.V. Vasil'ev, E.N. Matuzko, E.V. Krivonos // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 944. – P. 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012025.
7. Mishra R.S., De P.S., Kumar N. Friction stir welding and processing: science and engineering. – Cham: Springer International Publishing, 2014. – 338 p.
8. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Ovchinnikov V.V. Properties and structure of friction stir welded joints in 1424 and V-1461 (Al-Li) alloys // *Welding International*. – 2018. – Vol. 32, N 1. – P. 62–66. – DOI: 10.1080/09507116.2017.1382076.
9. Petch N.J. The cleavage strength of polycrystals // *Journal of the Iron & Steel Institute*. – 1953. – Vol. 174. – P. 25–28.
10. Friction-stir processed ultrafine grain high-strength Al-Mg alloy material / K.N. Kalashnikov, T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, A.N. Ivanov, S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1909. – P. 020075. – DOI: 10.1063/1.5013756.
11. EBSD analysis of friction stir welded 7136-T76 aluminum alloy / I. Kalemba, K. Muszka, M. Wróbel, S. Dymek, C. Hamilton // *Solid State Phenomena*. – 2013. – Vol. 203–204. – P. 258–261. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.203-204.258.
12. High-strength friction stir processed dispersion hardened Al-Cu-Mg alloy / K.N. Kalashnikov, T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, A.N. Ivanov, S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1909. – P. 020076. – DOI: 10.1063/1.5013757.
13. Recrystallization and related annealing phenomena / F.J. Humphreys, G.S. Rohrer, A. Rollet, M. Hatherly. – 2nd ed. – Amsterdam; Boston: Elsevier, 2004. – 658 p.
14. Багаряцкий Ю.А. Механизм искусственного старения сплава Al-Cu-Mg // *Доклады Академии наук СССР*. – 1952. – Т. 87. – С. 391–401.
15. On strain-induced dissolution of θ' and θ particles in Al-Cu binary alloy during equal channel angular pressing / Z. Liu, S. Bai, X. Zhou, Y. Gu // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – Vol. 528. – P. 2217–2222. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.060.

16. *Lomaev L., Elsukov E.P.* Mechanisms of the strain-induced dissolution of phases in nanostructured metals // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2008. – Vol. 72, iss. 10. – P. 1419–1422. – DOI: 10.3103/S1062873808100328.

17. On the coupling between precipitation and plastic deformation in relation with friction stir welding of AA2024 T3 aluminium alloy / C. Genevois, D. Fabregue, A. Deschamps, W.J. Poole // *Materials Science & Engineering A.* – 2006. – Vol. 441. – P. 39–48. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.151.

18. Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024–T3 friction stir welded joint / E. Bousquet, A. Poulon-Quintin, M. Puiggali, O. Devos, M. Touzet // *Corrosion Science.* – 2011. – Vol. 53. – P. 3026–3034. – DOI: 10.1016/j.corsci.2011.05.049.

19. Influence of process parameters on the microstructural evolution and mechanical characterisations of friction stir welded Al-Mg-Si alloy / S.O. Salih, N. Nigel, H. Ou, W. Sun // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2020. – Vol. 275. – P. 116366. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116366.

20. *Rajakumar S., Muralidharan C., Balasubramanian V.* Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints // *Materials and Design.* – 2011. – Vol. 32. – P. 535–549. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.08.025.

21. *Dialami N., Cervera M., Chiuementi M.* Defect formation and material flow in friction stir welding // *European Journal of Mechanics – A/Solids.* – 2020. – Vol. 80. – P. 103912. – DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103912.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Effect of Friction Stir Welding Mode and its Direction Relative to the Rolling Direction of 2024 Alloy on the Structure and Mechanical Properties of its Weld Joints

Alexey Ivanov^{1, 2, a, *}, Valery Rubtsov^{1, 2, b}, Evgeny Kolubaev^{1, 2, c}, Vladimir Bakshaev^{3, d},
Ivan Ivashkin^{3, e}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³SESPEL Cheboksary enterprise, CJSC, 36 Leningradskaya st., Cheboksary, 428021, Chuvash Republic, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>,  ivan@ispms.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>,  rvy@ispms.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>,  bakshaevva@mail.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0001-8808-2183>,  ivashkin_in@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 September 2020

Revised: 09 September 2020

Accepted: 17 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Friction stir welding
Welding condition parameters
Rolling direction
Aluminum alloy

Funding

This work was performed within the frame of integrated project « Building of manufacturing of high-tech large-sized equipment for intelligent adaptive friction stir welding for aerospace and transport industries of the Russian Federation» (grant agreement from 22.11.2019 № 075-11-2019-033), implemented by SESPEL Cheboksary enterprise, CJSC, NETI and ISPMS SB RAS with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia in the context of Russian Government decree from 09.04.2010 № 218.

ABSTRACT

Introduction. Friction stir welding conditions determines character of thermomechanical impact on welded material, so a critical alteration of even one of condition parameters can result in formation of defects and strength decrease of welded joint. Also an important factor is an orientation of welded material relative to a welding direction since it determines kinetics of material deformation and consequently its final structure and properties. Research efforts of friction stir welding properties generally consist in analysis of final properties of obtained weld joints and its correlation with parameters of welding condition. But to solve a problem of obtaining of weld joints with strength and quality, it's also important to estimate a welded material resistance to deformation from welding tool impact which could be achieved by monitoring a number of parameters directly in process of welding. **The purpose of the work** is to research an impact of welding condition parameters and an orientation of welded material's structure on friction stir welding process behavior and also on structure and strength of weld joints of 2024 aluminum alloy. **Results and discussion.** By monitoring the torque and welding force, it is shown that as the tool penetration force increases, the material's resistance to deformation increases. When welding is longitudinal to the direction of base metal rolling a torque and a welding force parameters decreases in value of 5-20%. An increase of welding speed provides a growing of material resistance to welding tool movement, at that, a direction of welding doesn't have a significant impact. With an increase of welding tool rotational speed, a material resistance to deformation decreases, a welding temperature grows and it results in growing of material's plasticization degree and in improvement of its mass transfer conditions. It is also shown that the welding conditions, which allows welding the 2024 alloy at a temperature of 450 – 500 °C, provides the degree of plasticization of the material, at which welded joints with a high-quality structure and high mechanical properties are obtained. In this conditions a direction of welding in relation to the direction of base metal rolling has an impact: when welding is longitudinal to the direction of rolling the tensile strength of weld joints reaches a value of 92 %, and when welding is transverse – 95% of base material tensile strength.

For citation: Ivanov A.N., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Bakshaev V.A., Ivashkin I.N. Effect of friction stir welding mode and its direction relative to the rolling direction of 2024 alloy on the structure and mechanical properties of its weld joints. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 110–123. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-110-123. (In Russian).

* Corresponding author

Ivanov Alexey N., Ph.D. (Engineering), Scientific associate
Institute of Strength Physics and Materials,
Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
2/4 pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7 (382) 228-68-63, e-mail: ivan@ispms.tsc.ru

References

1. Tougne A., Desrayand C., Jahazi M., Feulvach E. On material flow in friction stir welded Al alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 239, pp. 284–296. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.030.
2. Ovchinnikov V.V., Drits A.M. Tekhnologicheskie osobennosti svarki treniem s peremeshivaniem soedinenii alyuminiyevykh splavov sistemy Al-Mg [Technological peculiarities of friction welding with Al-Mg aluminum alloys stir]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2019, no. 3, pp. 7–20. DOI: 10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899.
3. Podržaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding. *Metallurgija*, 2015, vol. 54, iss. 2, pp. 387–389.
4. Kolubaev A.V., Zaikina A.A., Sizova O.V., Ivanov K., Filippov A., Kolubaev E. On the similarity of deformation mechanisms during friction stir welding and sliding friction of the AA5056 alloy. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 60 (12), pp. 2123–2129. DOI: 10.1007/s11182-018-1335-4.
5. Soni N., Chandrashekhar S., Kumar A., Chary V.R. Defects formation during friction stir welding: a review. *International Journal of Engineering and Management Research*, 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 121–125. DOI: 10.13140/RG.2.2.19381.93921.
6. Chernykh I.K., Vasil'ev E.V., Matuzko E.N., Krivonos E.V. Upgrading weld quality of a friction stir welded aluminum alloys AMG6. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 944, p. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012025.
7. Mishra R.S., De P.S., Kumar N. *Friction stir welding and processing: science and engineering*. Cham, Springer International Publishing, 2014. 338 p.
8. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Ovchinnikov V.V. Properties and structure of friction stir welded joints in 1424 and V-1461 (Al-Li) alloys. *Welding International*, 2018, vol. 32, no. 1, pp. 62–66. DOI: 10.1080/09507116.2017.1382076.
9. Petch N.J. The cleavage strength of polycrystals. *Journal of the Iron & Steel Institute*, 1953, vol. 174, pp. 25–28.
10. Kalashnikov K.N., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Ivanov A.N., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Friction-stir processed ultrafine grain high-strength Al-Mg alloy material. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1909, p. 020075. DOI: 10.1063/1.5013756.
11. Kalemba I., Muszka K., Wróbel M., Dymek S., Hamilton C. EBSD analysis of friction stir welded 7136-T76 aluminum alloy. *Solid State Phenomena*, 2013, vol. 203–204, pp. 258–261. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.203-204.258.
12. Kalashnikov K.N., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Ivanov A.N., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. High-strength friction stir processed dispersion hardened Al-Cu-Mg alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1909, p. 020076. DOI: 10.1063/1.5013757.
13. Humphreys F.J., Rohrer G.S., Rollet A., Hatherly M. *Recrystallization and related annealing phenomena*. 2nd ed. Amsterdam, Boston, Elsevier, 2004. 658 p.
14. Bagaryatskii Yu.A. Mekhanizm iskusstvennogo stareniya splava Al-Cu-Mg [The mechanism of artificial aging of Al-Cu-Mg alloys]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1952, vol. 87, pp. 391–401. (In Russian).
15. Liu Z., Bai S., Zhou X., Gu Y. On strain-induced dissolution of θ' and θ particles in Al-Cu binary alloy during equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A.*, 2011, vol. 528, pp. 2217–2222. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.060.
16. Lomaev L., Elsukov E.P. Mechanisms of the strain-induced dissolution of phases in nanostructured metals. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2008, vol. 72, iss. 10, pp. 1419–1422. DOI: 10.3103/S1062873808100328.
17. Genevois C., Fabregue D., Deschamps A., Poole W.J. On the coupling between precipitation and plastic deformation in relation with friction stir welding of AA2024 T3 aluminium alloy. *Materials Science & Engineering A.*, 2006, vol. 441, pp. 39–48. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.151.
18. Bousquet E., Poulon-Quintin A., Puiggali M., Devos O., Touzet M. Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024–T3 friction stir welded joint. *Corrosion Science*, 2011, vol. 53, pp. 3026–3034. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.05.049.



19. Salih O.S., Neate N., Ou H., Sun W. Influence of process parameters on the microstructural evolution and mechanical characterisations of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 275, p. 116366. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116366.

20. Rajakumar S., Muralidharan C., Balasubramanian V. Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials and Design*, 2011, vol. 32, pp. 535–549. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.08.025.

21. Dialami N., Cervera M., Chiumenti M. Defect formation and material flow in friction stir welding. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2020, vol. 80, p. 103912. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103912. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.103912>.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние направления проката АМг5 на микроструктуру и свойства сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием

Анастасия Гусарова^{1, a, *}, Валерий Рубцов^{1, 2, b}, Евгений Колубаев^{1, 2, c}, Владимир Бакшаев^{3, d}, Юрий Никитин^{3, e}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», ул. Ленинградская, 36, г. Чебоксары, 428021, Чувашская Республика, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, gusarova@ispms.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>, vlba@sessel.com,

^e <https://orcid.org/0000-0002-6514-7383>, urni@sessel.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152.341:620.172

История статьи:

Поступила: 01 сентября 2020
 Рецензирование: 14 сентября 2020
 Принята к печати: 21 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
 Алюминиевый прокат
 Направление проката
 Микроструктура
 Механические свойства

Финансирование:

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание производства высоко-технологичного крупногабаритного оборудования интеллектуальной адаптивной сварки трением с перемешиванием для авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 22.11.2019 № 075-11-2019-033), реализуемого ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», НГТУ и ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

АННОТАЦИЯ

Введение. Выделение тепла и пластическая деформация при сварке трением с перемешиванием (СТП) вызывают глубокие изменения микроструктуры и структурных свойств сварных соединений. Размер зерна, эволюция кристаллографической текстуры и выделение вторичных фаз являются наиболее важными микроструктурными изменениями в процессе сварки алюминиевых сплавов, которые в значительной степени влияют на прочностные свойства сварных соединений. Кроме технологических параметров процесса СТП (усилия внедрения инструмента, его частоты вращения и скорости перемещения) значительным фактором, определяющим свойства получаемых сварных соединений, также является взаимная ориентация структурных элементов свариваемого материала и направления воздействия инструмента на материал в процессе сварки. **Цель данной работы:** исследование совместного влияния направления исходного проката и усилия прижима инструмента в процессе СТП на структуру и свойства сварных соединений из алюминиевого сплава АМг5. **Методы.** Методами исследования являются механические испытания на статистическое растяжение, определение микротвердости, а также металлографический анализ структуры сварных швов. **Результаты и обсуждения.** В результате было установлено, что при низких значениях величины осевого усилия на инструменте (7 кН) в сварных соединениях наблюдаются дефекты типа линии стыка и пустот как вдоль, так и поперек направления проката. При увеличении нагрузки от 8 до 12 кН формируются бездефектные сварные соединения с повышенными механическими свойствами. Установлено, что направление проката АМг5 в процессе СТП не влияет на структуру и предел прочности сварных швов, но влияет на относительное удлинение и микротвердость. Показано, что в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП поперек листового проката АМг5, относительное удлинение выше в 1,3...2 раза, а микротвердость выше на 4...10 %, чем в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП вдоль листового проката АМг5.

Для цитирования: Влияние направления проката АМг5 на микроструктуру и свойства сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / А.В. Гусарова, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, В.А. Бакшаев, Ю.В. Никитин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 124–136. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136.

*Адрес для переписки

Гусарова Анастасия Владимировна, м.н.с.
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: +7 (996) 937-71-35, e-mail: gusarova@ispms.ru

Введение

Известно, что алюминиевые сплавы широко используются для изготовления конструкций различного назначения, особенно в авиационной промышленности. Конструкционные детали из алюминиевых сплавов можно сваривать, используя традиционную сварку плавлением. Однако обычная сварка плавлением приводит к возникновению многочисленных дефектов, таких как пористость, горячее растрескивание и т. д. [1]. Сварка трением с перемешиванием (СТП) как метод соединения алюминиевых сплавов в твердом состоянии имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной сваркой плавлением. Поскольку температура, создаваемая в процессе СТП, ниже, чем температура плавления свариваемых материалов, то некоторые дефекты, такие как пористость, хрупкие междендритные и эвтектические фазы, образующиеся во время затвердевания, могут быть устранены [2–5]. Соответственно технология СТП привлекательна для современной промышленности своей высокопроизводительностью и возможностью широкого применения. Процесс СТП также используется для сборки разнородных материалов, которые становятся все более востребованными в промышленности из-за ряда технических и экономических преимуществ [6–8].

Согласно данным литературы, большинство предыдущих исследований по СТП сосредоточено на влиянии параметров процесса, таких как геометрия инструмента, скорость вращения, скорость сварки, угол наклона инструмента [9–13], основные материалы и их расположение на наступающей или отступающей стороне [14–17], толщина основного материала [18]. Совсем мало данных о влиянии направления проката алюминиевых сплавов на структуру и механические свойства сварных соединений. Например, в работе [19] авторы исследовали три типа комбинаций сварных швов в зависимости от направления соединяемого материала: «вдоль-вдоль», «вдоль-поперек», «поперек-поперек». Показано, что прочность и пластичность сварных соединений АА6111-Т4 толщиной 1,5 мм можно немного улучшить с помощью комбинированного типа «вдоль-поперек». Однако авторы отмечают, что в реальных условиях работы, когда на сварные соединения действуют силы с разных сторон,

значения механических свойств для данной комбинации могут существенно различаться, поэтому необходимы дополнительные исследования.

В работе [20] авторы исследовали влияние направления соединяемого материала на микроструктуру и механические свойства разнородных сварных соединений (АА2024-Т351 и АА7075-Т651) в процессе СТП. Прокат АА2024-Т351 и АА7075-Т651 соединяли с помощью шести различных комбинаций направлений проката: «вдоль-вдоль», «поперек-поперек», «вдоль-поперек», «45°-45°», «45°-вдоль», «поперек-45°». Показано, что комбинация «45°-вдоль» приводит к ухудшению механических свойств при испытаниях на растяжение, в то время как качественные соединения могут быть достигнуты с помощью других пяти типов комбинаций [20]. Установлено, что максимальный предел прочности на разрыв составляет 445,6 МПа для соединения «вдоль-поперек» в результате оптимального количества подводимого тепла и достаточного потока материала [20]. Таким образом, различные комбинации направления проката исходного материала существенно влияют на микроструктуру и свойства сварных соединений. Но в данной работе не отмечено, при каких технологических параметрах процесса СТП проводили исследования.

На основании анализа литературы можно сделать вывод о том, что исследований совместного влияния направления проката на структурные и прочностные свойства алюминиевых сплавов недостаточно. Кроме того, отсутствуют данные о влиянии технологических параметров на сварные соединения, полученные при различных комбинациях направления проката алюминиевых сплавов. Поэтому **в настоящей работе исследовалось** совместное влияние направления проката АМг5 и осевого усилия на сварочном инструменте в процессе СТП на структуру и свойства сварных соединений.

Методика исследований

В работе исследованы сварные соединения деформируемого алюминиевого сплава АМг5. С использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton 3xlt Goldd+ был исследован химический состав сплава: Mg 5,4 вес. %; Mn 0,4 вес. %; Fe 0,4 вес. %; Si 0,2 вес. %;

Zn 0,03 вес. %; Cu 0,02 вес. %; Al остальное. В качестве заготовок использовали пластины размерами 60×250 мм, вырезанные из листа АМг5 толщиной 2,5 мм. Свариваемые кромки заготовок были фрезерованы, прилегающая к ним лицевая часть также была фрезерована до толщины заготовки 2,0 мм. Для данного исследования было выбрано две комбинации направления проката АМг5: вдоль направления проката и поперек направления проката.

Сварку трением с перемешиванием заготовок из АМг5 проводили в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН на оборудовании для СТП (рис. 1, а) с использованием 12 технологических режимов, приведенных в таблице. Значения параметров при переходе от одного режима к другому изменялись в следующих диапазонах: частота вращения инструмента (ω) – от 800 до 1000 об/мин, скорость сварки (V) – от 200 до 400 мм/мин и осевое усилие на сварочном инструменте (P) – от 6,0 до 12,0 кН. В процес-

се СТП проводился тепловизионный контроль поверхности сварного соединения с использованием тепловизора Flir A655sc (рис. 1).

Полученные сварные соединения из АМг5 выдерживались при нормальных условиях в течение 72 ч. Образцы для испытаний на одноосное растяжение вырезались из соединений в поперечном направлении таким образом, чтобы сварное соединение располагалось в центре рабочей части образца. Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине УТС-110М-100 со скоростью движения захвата 10 мм/мин. Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере Dura-min-5 по структурным зонам: в зоне перемешивания (stirred zone, SZ), в зоне термомеханического воздействия (thermomechanically affected zone, TMAZ) с отступающей стороны и в зоне основного материала (base material, BM). В каждой структурной зоне делали по пять уколов и рассчитывали среднее значение. Для металло-

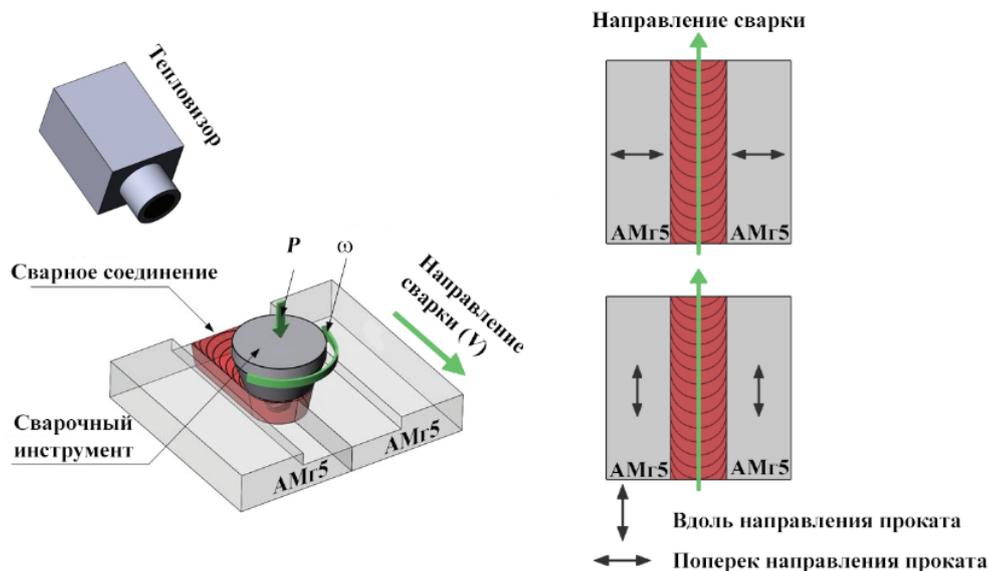


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Fig. 1. Friction stir welding process scheme

Технологические параметры процесса СТП
Technological parameters of the FSW process

Параметр / Parameter	Режим / Condition											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P , кН	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,5	6,0	9,0	10,0	11,0	12,0
V , мм/мин	200	200	200	300	300	300	300	300	300	300	350	400
ω , об/мин	800	800	900	900	900	1000	900	800	900	900	900	900

графических исследований электроэрозионным способом вырезались шлифы с их последующим полированием и травлением. Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе «Альтами MET 1С».

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена макроструктура образцов из сплава АМг5 толщиной 2 мм, полученных при сварке по режимам 1–12 (см.

таблицу) вдоль и поперек направления проката. Из рисунка видно, что для всех образцов формируется сварной шов с характерными структурными зонами СТП соединения: зоной перемешивания (SZ), зоной термомеханического воздействия (ТМАЗ), зоной термического влияния (ТАЗ) и основного металла (ВМ).

В структуре сварных соединений, полученных по режимам 1–4 вдоль и поперек направления листового проката АМг5, присутствуют дефекты типа линии стыка, а в образцах по ре-

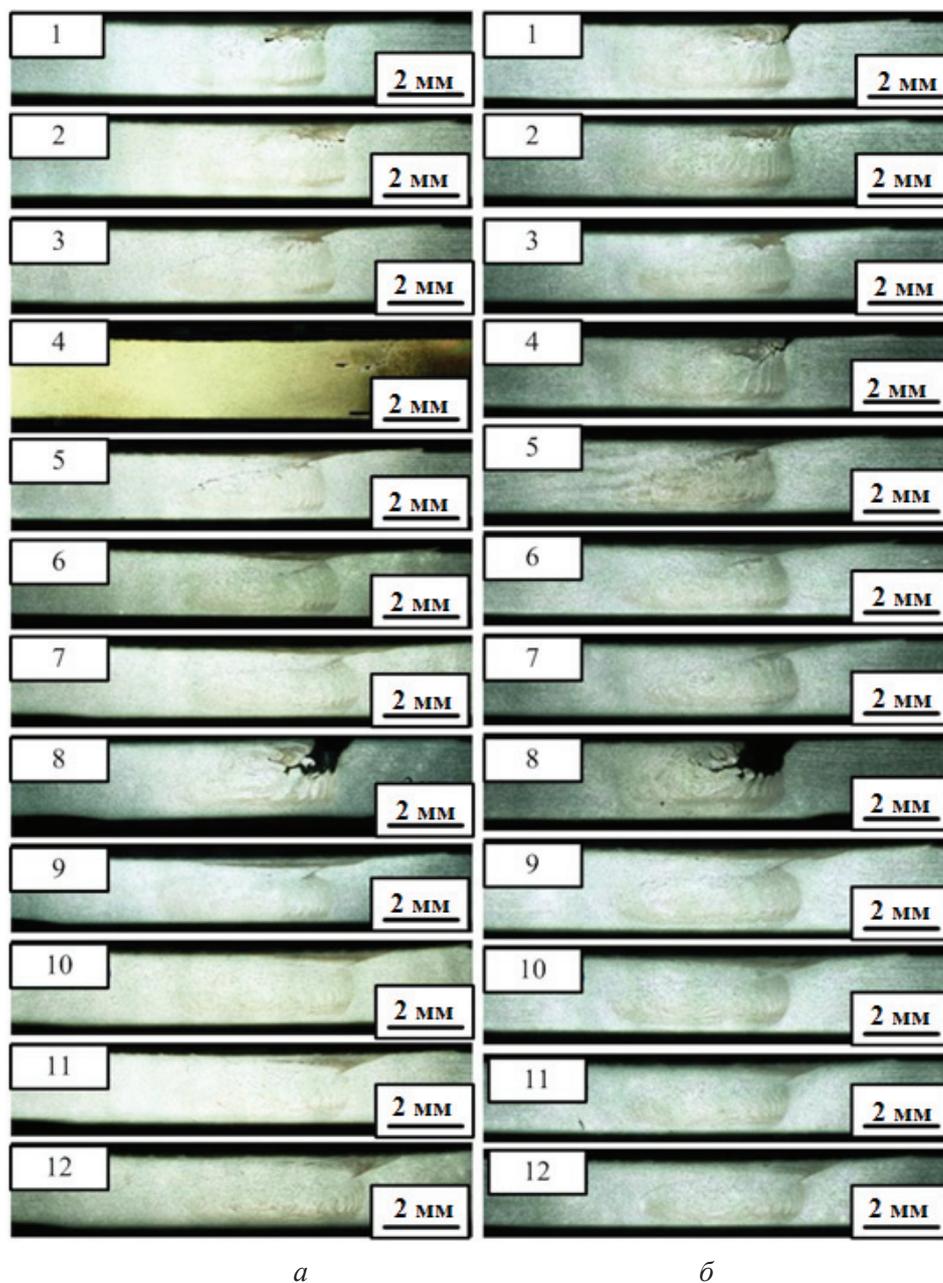


Рис. 2. Макроструктура сварных соединений сплава АМг5, полученных СТП по режимам 1–12 вдоль (а) и поперек (б) направления проката

Fig. 2. Macrostructure of weld joints of the AA5056 alloy obtained by FSW in modes 1–12 in the rolling (a) and transverse (b) directions

жимам 1, 2 и 4 присутствуют непровары с наступающей стороны сварного шва (рис. 2, а, б). Наличие непроваров обусловлено недостаточным усилием прижима инструмента к свариваемым материалам *P*, которое для режимов 1–4 составляет 7 кН. Анализ изменения профиля температуры в зоне сварки при получении образцов по режимам 1–4 как вдоль, так и поперек направле-

ния листового проката из АМг5 демонстрирует скачки температуры, свидетельствующие о неравномерном нагреве и переносе материала инструментом, что ведет к формированию дефектов в процессе сварки (рис. 3, а, б).

Увеличение осевого усилия на инструменте до 8,0...8,5 кН в режимах 5–7 позволяет устранить непровары в зоне перемешивания (см. та-

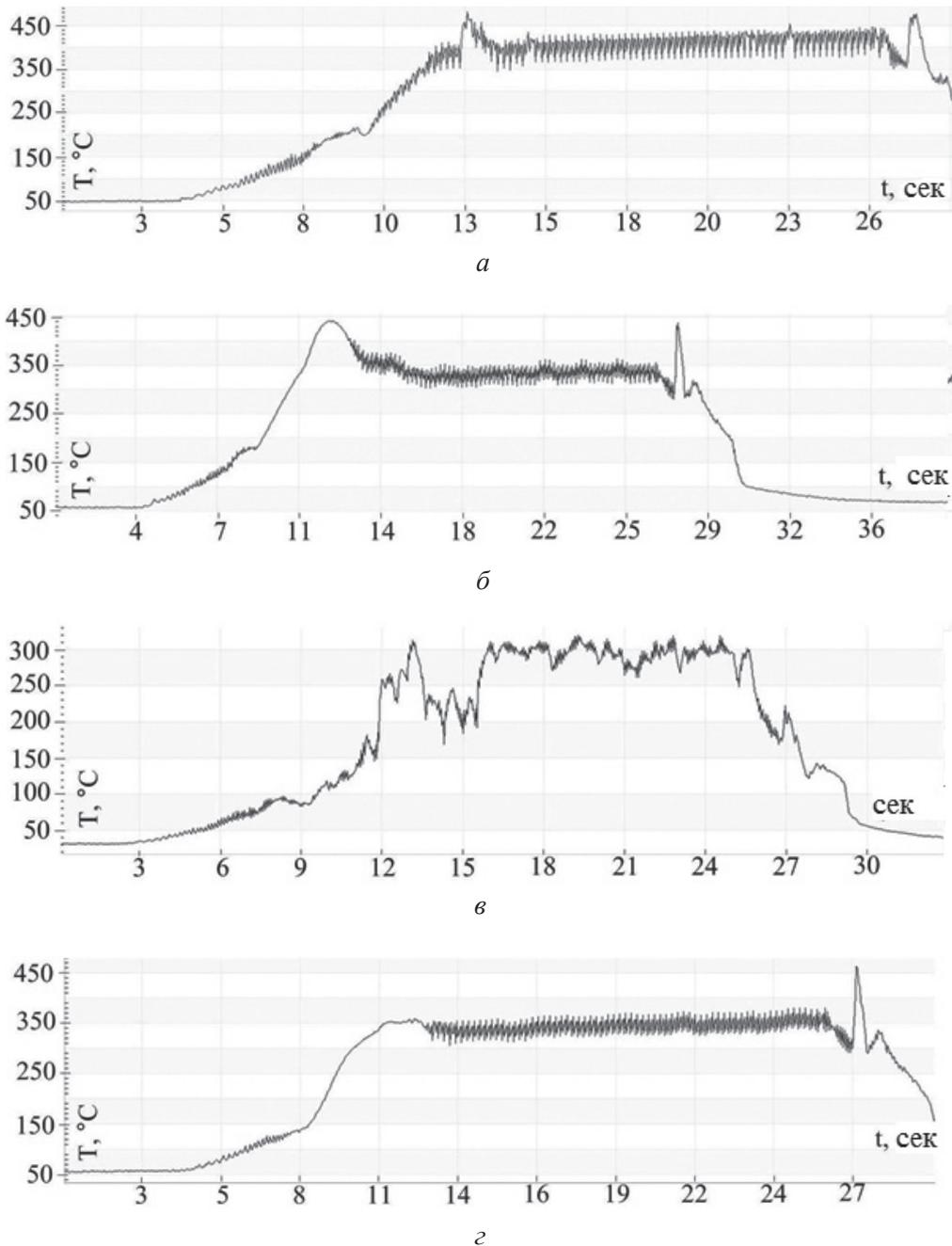


Рис 3. Температурный профиль СТП по режиму и относительно направления проката:

a – 4, вдоль; *б* – 3, поперек; *в* – 8, вдоль; *г* – 7, поперек

Fig. 3. FSW thermal profile by the mode and relative to the rolling direction:

a – 4, in the rolling direction; *б* – 3, in the transverse direction; *в* – 8, in the rolling direction; *г* – 7, in the transverse direction

блицу, рис. 2). Исключение составляет сварное соединение, полученное по режиму 8, для которого использовали очень низкое значение нагрузки ($P = 6$ кН) при $V = 300$ мм/мин и $\omega = 800$ об/мин. Такие технологические параметры привели к образованию крупного непровара при сварке вдоль и поперек направления проката (рис. 2, а, б). Это подтверждается данными тепловизора, согласно которому профиль температуры при сварке изменяется скачкообразно на протяжении всего процесса СТП и не превышает 330 ± 10 °С. Это подтверждает недогрев и неравномерный перенос материала инструментом, в результате чего образуется дефект (рис. 3, в).

Дальнейшее увеличение нагрузки инструмента на образцы с 9 до 12 кН в режимах 9–12 при практически тех же параметрах скорости перемещения инструмента (300...400 мм/мин) и частоте вращения инструмента 900 об/мин приводит к отсутствию видимых объемных дефектов, а наличие линии стыка в их структуре является наименее выраженным (рис. 2). Это указывает на то, что для достижения бездефектной структуры в образцах как вдоль, так и поперек направления листового проката из АМг5 необходимо использовать величину осевого усилия не менее 9 кН при скорости перемещения инструмента 300...400 мм/мин и частоте вращения инструмента 900 об/мин. Анализ температурных профилей образцов, сваренных вдоль и поперек направлений листового проката из АМг5, показал, что при режимах 5–7, 9–12 (т. е. при режимах без дефектов в виде пустот) температура во время процесса СТП изменяется незначительно и остается на уровне $0,6 \dots 0,8 T_{\text{пл}}$ (где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления АМг5), как, например, показано для режима 7 при сварке образцов поперек направления листового проката АМг5 (рис. 3, з). При всех режимах с образованием бездефектного соединения температура при выходе инструмента увеличивается относительно температуры при СТП на 10...20 %.

Металлографические исследования структуры сварных соединений показали, что структура их материала не изменяется существенно в зависимости от направления СТП относительно направления проката (рис. 4). Формируется типичное для процесса СТП-соединения строение зоны ТМАЗ и зоны SZ. Зона SZ всех сварных

соединений, кроме полученных по режиму 8 (рис. 4, в), характеризуется динамически рекристаллизованными зернами (рис. 4, а, б, з). Из рис. 4, в видно, что в сварном соединении, полученном по режиму 8, в зоне перемешивания имеется непровар, который тем не менее не влияет на распределение фаз в материале. В сварных соединениях АМг5, имеющих непровары в структуре (режимы 1–4), независимо от направления проката формируется типичная структура, представленная на рис. 4, а. Несмотря на дефект, в структурах соединений зона перемешивания имеет мелкозернистую рекристаллизованную структуру. В сварных соединениях, структура которых не имеет очевидных дефектов, независимо от направления проката наблюдается типичная микроструктура, представленная на (рис. 4, б, з).

На рис. 5 представлены результаты исследования микротвердости образцов, полученных по режимам 1–12. Из рис. 5, а видно, что микротвердость бездефектных образцов (по режимам 5–7, 9–12), полученных поперек направления проката, выше, чем у образцов, полученных вдоль направления проката. Исключение составляют образцы, полученные по режимам 1–4 и 8, имеющие дефекты. Стоит отметить, что с увеличением осевого усилия на сварочном инструменте увеличивается значение микротвердости в зоне перемешивания.

Существенных различий в значениях микротвердости зоны термомеханического воздействия соединений, полученных сваркой вдоль и поперек направления проката, не выявлено (рис. 5, б). Микротвердость базового материала в обоих направлениях относительно направления его проката характеризуется более низкими значениями – на 9...13 %, чем в зонах перемешивания и термомеханического воздействия, что может быть связано с грубокристаллическим строением его структуры (рис. 5, в).

На рис. 6 представлены результаты механических испытаний на растяжение для образцов в каждом из направлений при режимах 1–12. В результате проведения механических испытаний было установлено, что разрушение образцов происходит в основном с образованием двух взаимно пересекающихся трещин под углом 45° к оси образца либо взаимно не пересекающихся

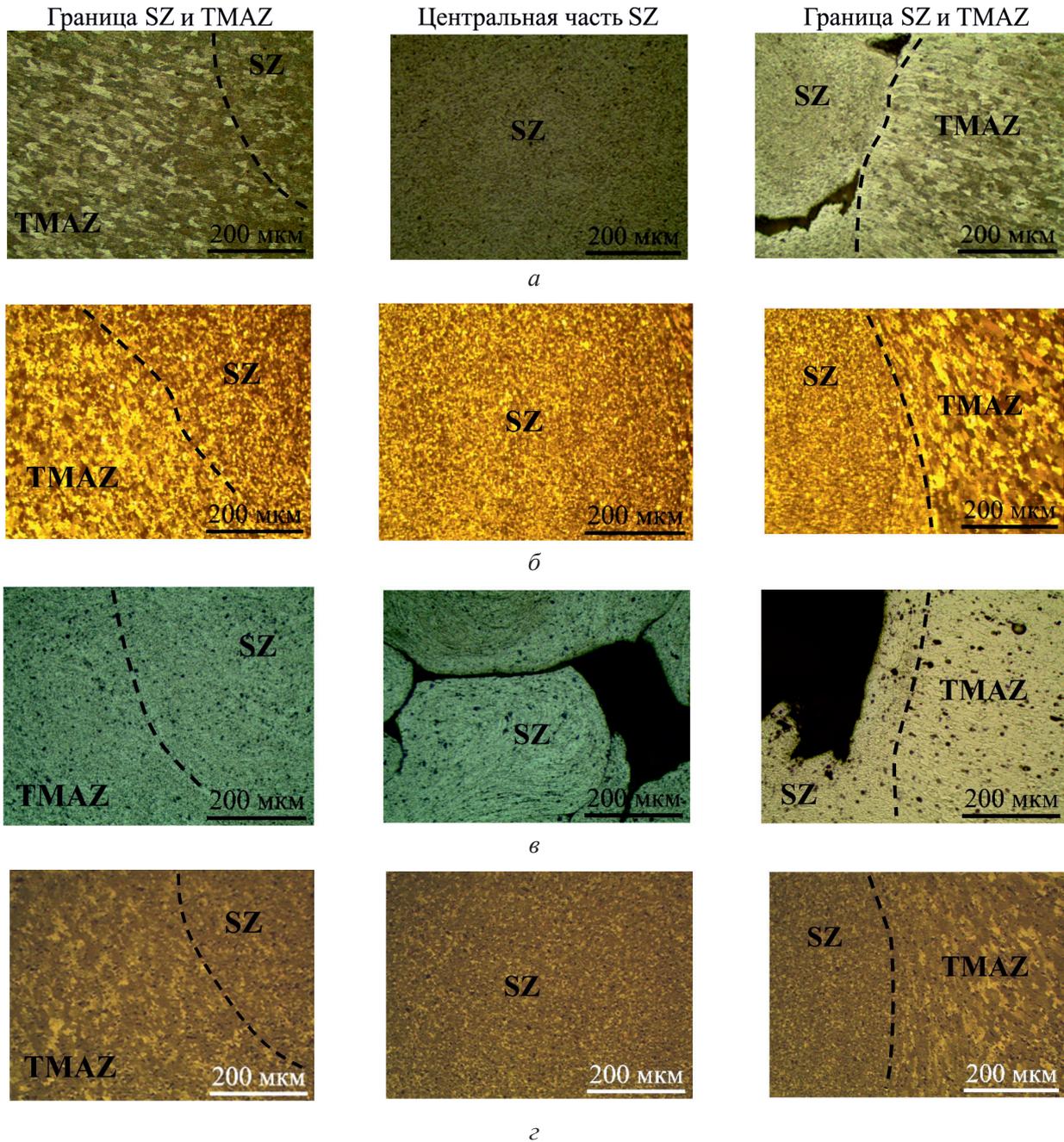


Рис. 4. Микроструктура соединений, сваренных по режиму и относительно направления проката:

a – 4, вдоль; *б* – 7, поперек; *в* – 8, вдоль; *г* – 9, поперек

Fig. 4. Microstructure of joints, welded by the mode and relative to the rolling direction:

a – 4, in the rolling direction; *б* – 7, in the transverse direction; *в* – 8, in the rolling direction; *г* – 9, in the transverse direction

трещин с образованием долома между ними. Как видно из рис. 6, *a*, для бездефектных образцов как вдоль, так и поперек направления листового проката АМг5 предел прочности варьируется в пределах 84...98 % от прочности основного металла АМг5, который составляет 333,50±0,8 МПа. Значения относительного удлинения для бездефектных образцов, получен-

ных поперек направления листового проката АМг5 при режимах 5–7, выше в 1,3...2 раза, а при режимах 9, 10 и 12 – выше в 1,8...2 раза по сравнению с образцами, сваренными вдоль направления проката АМг5. Значения относительного удлинения хорошо коррелируют с данными по микротвердости в зоне перемешивания (рис. 5, *a*).

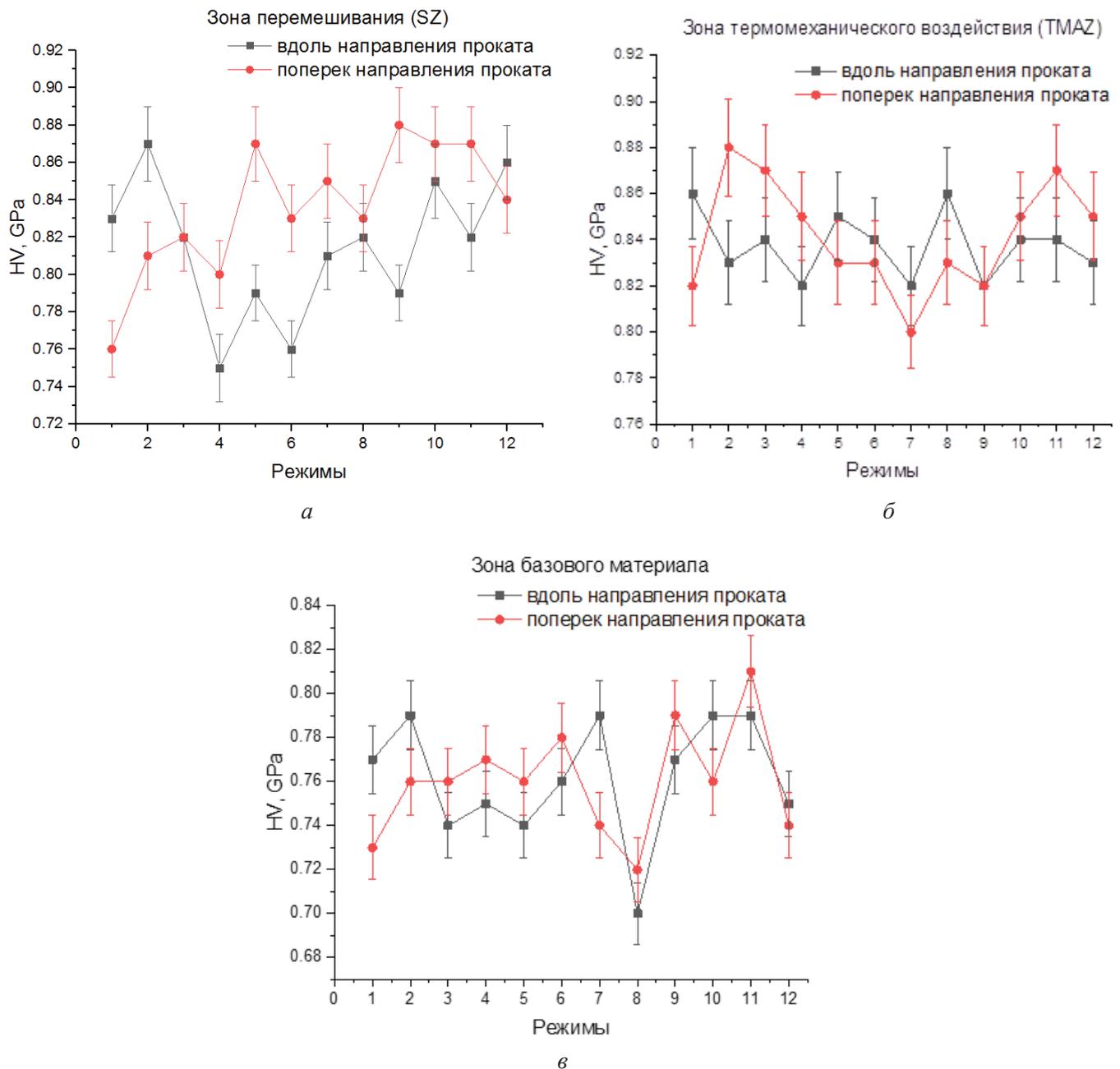


Рис. 5. Микротвердость образцов сплава АМг5 толщиной 2 мм, полученных при сварке вдоль и поперек направлений проката по режимам 1–12:

a – в зоне перемешивания; *б* – в зоне термомеханического воздействия; *в* – в зоне базового материала

Fig. 5. Microhardness of the AA5056 alloy samples 2 mm thick, obtained during welding in the rolling and transverse directions of rolling in modes 1–12:

a – in the stir zone; *b* – in the thermomechanical impact zone; *v* – in the base material zone

Заклучение

В работе было исследовано влияние направления проката листовых заготовок на структуру и свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов АМг5 при различных режимах в процессе СТП. Установлено, что при значении усиления инструмента, равном 7 кН (при

200...300 мм/мин, 800...900 об/мин), в сварных соединениях наблюдаются дефекты типа линии стыка и пустот как вдоль, так и поперек направления проката. Увеличение нагрузки от 8 до 12 кН позволяет получать бездефектные образцы с повышенными механическими свойствами. Показано, что для термонеупрочняемого сплава АМг5 направление проката в процессе СТП не влияет

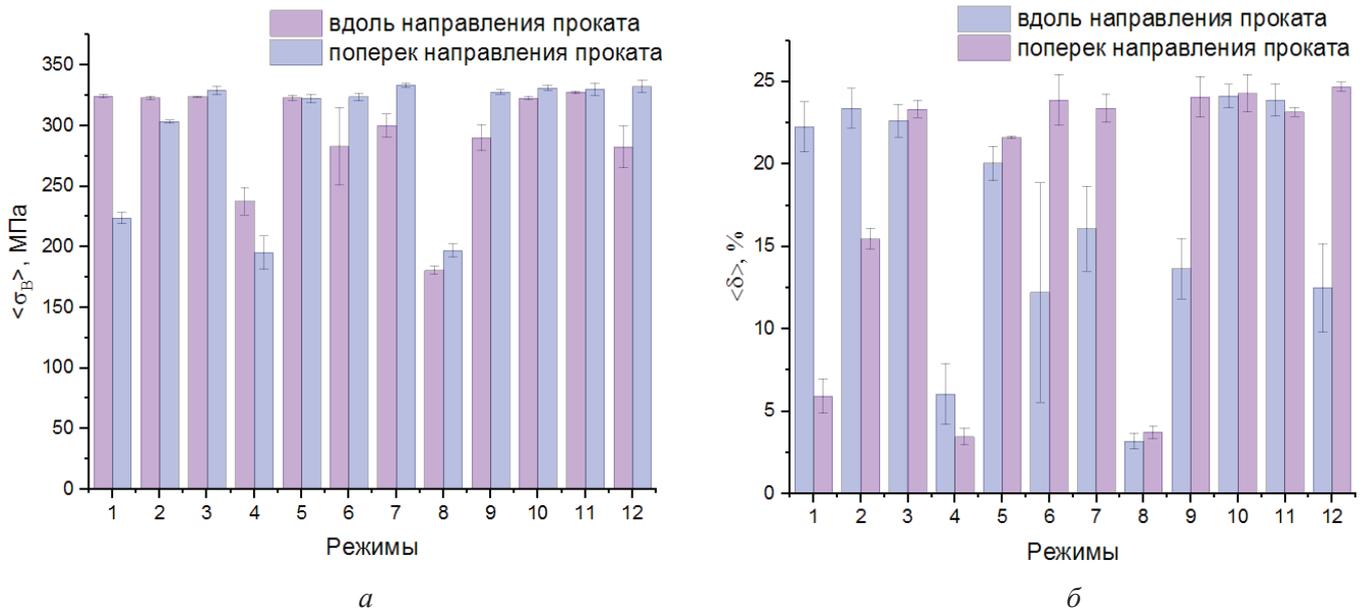


Рис. 6. Механические свойства образцов сплава АМг5 толщиной 2 мм, полученных при сварке вдоль и поперек направлений проката по режимам 1–12:

а – предел прочности; б – относительное удлинение

Fig. 6. Mechanical properties of the AA5056 alloy samples 2 mm thick, obtained during welding in the rolling and transverse directions of rolling in modes 1–12:

a – tensile strength; b – relative elongation

на структуру и предел прочности сварных швов при режимах 5–7 и 9–12, позволяющих получать структуру швов без дефектов в виде пустот. Направление проката АМг5 значительно влияет на относительное удлинение и микротвердость в зоне перемешивания образцов. Установлено, что в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП поперек листового проката АМг5, относительное удлинение выше в 1,3...2 раза, а микротвердость выше на 4...10%, чем в зоне перемешивания сварных швов, полученных СТП вдоль листового проката АМг5.

Список литературы

1. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 36. – P. 571–600. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.10.005.
2. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties // *Progress in Materials Science*. – 2008. – Vol. 53. – P. 980–1023. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
3. Friction stir welding of aluminium alloys / P. Threadgill, A. Leonard, H. Shercliff, P. Withers // *Journal International Materials Reviews*. – 2009. – Vol. 54. – P. 49–93. – DOI: 10.1179/174328009X411136.
4. Ma Z.Y. Friction stir processing technology: a review // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2008. – Vol. 39 (A). – P. 642–658. – DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.
5. Węglowski M.S. Friction stir processing – State of the art: review // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 18. – P. 114–129. – DOI: 10.1016/j.acme.2017.06.002.
6. Microstructure evolution of thermo-mechanically affected zone in dissimilar AA2024/7075 joint produced by friction stir welding / C. Zhang, G. Huang, Y. Cao, Y. Zhu, X. Huang, Y. Zhou, Q. Li, Q. Zeng, Q. Liu // *Vacuum*. – 2020. – Vol. 179. – P. 109515. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109515.
7. Gotawala N., Shrivastava A. Analysis of material distribution in dissimilar friction stir welded joints of Al 1050 and copper // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 57. – P. 725–736. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.043.
8. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds / M. Yu, H. Zhao, F. Xu, T. Chen, L. Zhou, X. Song, N. Ma // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 282, P. 116676. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116676.
9. Influence of tool rotational speed on local microstructure, mechanical and corrosion behavior of dissimilar AA2024/7075 joints fabricated by friction stir welding / C. Zhang, Y. Cao, G. Huang, Q. Zeng, Y. Zhu,



X. Huang, N. Li, Q. Liu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 49. – P. 214–226. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.031.

10. Microstructure of AA 2024 fixed joints formed by friction stir welding / Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Fortuna S.V., Kolubaev E.A. // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020047. – DOI: 10.1063/1.4932737.

11. Structure-property characteristics of Al-Cu joint formed by high-rotation-speed friction stir lap welding without tool penetration into lower Cu sheet / Q. Guan, H. Zhang, H. Liu, Q. Gao, M. Gong, F. Qu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 57. – P. 363–369. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.001.

12. Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints / D. Maneiah, D. Mishra, K.P. Rao, K.B. Raju // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 27, pt. 2. – P. 904–908. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.215.

13. Effect of friction stir welding parameters on defect formation / S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, A.A. Eliseev, E.A. Kolubaev, A.V. Filippov, A.N. Ivanov // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020230. – DOI: 10.1063/1.4932920.

14. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev, T.A. Kalashnikova // *Tribology International*. – 2017. – Vol. 115. – P. 191–198. – DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.

15. Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys / S.K. Park, S.T. Hong, J.H. Park, K.Y. Park,

Y.J. Kwon, H.J. Son // *Journal Science and Technology of Welding and Joining*. – 2010. – Vol. 15, iss. 4. – P. 331–336. – DOI: 10.1179/136217110X12714217309696.

16. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding / P. Cavaliere, R. Nobile, F.W. Panella, A. Squillace // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46, iss. 6. – P. 588–594. – DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.07.010.

17. Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys / R. Palanivel, P. Koshy Mathews, N. Murugan, I. Dinaharan // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 40. – P. 7–16. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.03.027.

18. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets / T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, K.N. Kalashnikov, S.V. Fortuna, E.A. Kolubaev, S.Yu. Tarasov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 806. – P. 1–20. – DOI: 10.3390/met10060806.

19. Formability evaluation of friction stir welded 6111-T4 sheet with respect to joining material direction / D. Kim, W. Lee, J. Kim, C. Kim, K. Chung // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2010. – Vol. 52. – P. 612–625. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.001.

20. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-7075 joints: Influence of joining material direction / C. Zhang, G. Huang, Y. Cao, Y. Zhu, W. Li, X. Wang, Q. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 766, iss. 24. – P. 138368. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138368.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



The Influence of the Rolling Direction of AA5056 on the Microstructure and Properties of Weld Joints obtained by Friction Stir Welding

Anastasia Gusarova^{1, a, *}, Valery Rubtsov^{1, 2, b}, Evgeny Kolubaev^{1, 2, c}, Vladimir Bakshaev^{3, d}, Yury Nikitin^{3, e}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³SESPEL Cheboksary enterprise, CJSC, 36 Leningradskaya st., Cheboksary, 428021, Chuvash Republic, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, gusarova@ispms.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, rvy@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-9777-0164>, vlba@sessel.com,

^e <https://orcid.org/0000-0002-6514-7383>, urni@sessel.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 September 2020

Revised: 14 September 2020

Accepted: 21 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Friction stir welding
 Rolled aluminum
 Rolling direction
 Microstructure
 Mechanical properties

Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project “Establishment of production of high-tech large-sized equipment for intelligent adaptive friction stir welding for the aerospace and transport industries of the Russian Federation” (Agreement No. 075-11-2019-033 dated November 22, 2019) implemented by the CJSC “Cheboksary enterprise “SespeL”, NSTU and the ISPMS SB RAS with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

ABSTRACT

Introduction. Heat emission and plastic deformation during friction stir welding (FSW) cause profound changes in the microstructure and structural properties of weld joints. The grain size, crystallographic texture evolution and second-phase precipitate are the most important microstructural changes during welding of aluminum alloys, which largely influence the strength properties of weld joints. In addition to process-dependent parameters (instrument sump force, its rotation frequency, and travel rate) of the FSW process, a significant factor, determining the properties of the obtained weld joints, is also a mutual orientation of structural elements of the weld material and the direction of the instruments impact on the material during welding. In this regard, the **purpose of the work** is to analyze the combined influence of the direction of the initial rolling and the instrument pressure during FSW on the structure and properties of weld joints from the AA5056 aluminum alloy. **Methods.** Research methods are mechanical tests for statistical tension, microhardness as well as metallographic analysis of the structure of welded joints. **Results and discussion.** As a result, it is established that at low values of the axial force on the instrument (7 kN), defects such as the joint line and voids are observed in welded joints both rolling and transverse directions. When the load increases from 8 kN to 12 kN, defect-free weld joints with enhanced mechanical properties form. It is determined that the rolling direction of AA5056 during FSW does not influence the structure and tensile strength of the weld joints, but it influences the relative elongation and microhardness. It is shown that in the stir zone of the weld joint, obtained by FSW in the transverse direction of AA5056 flats, the relative elongation is 1.3-2 times greater, and the microhardness is by 4-10% greater than that in the stir zone of weld joints, obtained by FSW in the rolling direction of AA5056 flats.

For citation: Gusarova A.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Bakshaev V.A., Nikitin Yu.V. The influence of the rolling direction of AA5056 on the microstructure and properties of weld joints obtained by friction stir welding. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 124–136. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-124-136. (In Russian).

* Corresponding author

Gusarova Anastasia V., Postgraduate, Junior researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Science of
 Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
 2/4 pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7 (996) 937-71-35, e-mail: gusarova@ispms.ru

References

1. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 36, pp. 571–600. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.10.005.
2. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53, pp. 980–1023. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
3. Threadgill P., Leonard A., Shercliff H., Withers P. Friction stir welding of aluminium alloys. *Journal International Materials Reviews*, 2009, vol. 54, pp. 49–93. DOI: 10.1179/174328009X411136.
4. Ma Z.Y. Friction stir processing technology: a review. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, vol. 39 (A), pp. 642–658. DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.
5. Węglowski M.S. Friction stir processing – State of the art: review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 18, pp. 114–129. DOI: 10.1016/j.acme.2017.06.002.
6. Zhang C., Huang G., Cao Y., Zhu Y., Huang X., Zhou Y., Li Q., Zeng Q., Liu Q. Microstructure evolution of thermo-mechanically affected zone in dissimilar AA2024/7075 joint produced by friction stir welding. *Vacuum*, 2020, vol. 179, p. 109515. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109515.
7. Gotawala N., Shrivastava A. Analysis of material distribution in dissimilar friction stir welded joints of Al 1050 and copper. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 725–736. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.043.
8. Yu M., Zhao H., Xu F., Chen T., Zhou L., Song X., Ma N. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 282, p. 116676. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116676.
9. Zhang C., Cao Y., Huang G., Zeng Q., Zhu Y., Huang X., Li N., Liu Q. Influence of tool rotational speed on local microstructure, mechanical and corrosion behavior of dissimilar AA2024/7075 joints fabricated by friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 49, pp. 214–226. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.031.
10. Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Fortuna S.V., Kolubaev E.A. Microstructure of AA 2024 fixed joints formed by friction stir welding. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1683, p. 020047. – DOI: 10.1063/1.4932737.
11. Guan Q., Zhang H., Liu H., Gao Q., Gong M., Qu F. Structure-property characteristics of Al-Cu joint formed by high-rotation-speed friction stir lap welding without tool penetration into lower Cu sheet. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 363–369. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.001.
12. Maneiah D., Mishra D., Rao K.P., Raju K.B. Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, pt. 2, pp. 904–908. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.215.
13. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Eliseev A.A., Kolubaev E.A., Filippov A.V., Ivanov A.N. Effect of friction stir welding parameters on defect formation. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1683, p. 020230. DOI: 10.1063/1.4932920.
14. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Kolubaev E.A., Kalashnikova T.A. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy. *Tribology International*, 2017, vol. 115, pp. 191–198. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.
15. Park S.K., Hong S.T., Park J.H., Park K.Y., Kwon Y.J., Son H.J. Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys. *Journal Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, vol. 15, iss. 4, pp. 331–336. DOI: 10.1179/136217110X12714217309696.
16. Cavaliere P., Nobile R., Panella F.W., Squillace A. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, iss. 6, pp. 588–594. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.07.010.
17. Palanivel R., Koshy Mathews P., Murugan N., Dinaharan I. Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys. *Materials and Design*, 2012, vol. 40, pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.03.027.

18. Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K.N., Fortuna S.V., Kolubaev E.A., Tarasov S.Yu. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 806, pp. 1–20. DOI: 10.3390/met10060806.
19. Kim D., Lee W., Kim J., Kim C., Chung K. Formability evaluation of friction stir welded 6111-T4 sheet with respect to joining material direction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, vol. 52, pp. 612–625. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.001.
20. Zhang C., Huang G., Cao Y., Zhu Y., Li W., Wang X., Liu Q. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-7075 joints: Influence of joining material direction. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 766, iss. 24, p. 138368. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138368.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Многофазные покрытия Cu-Ti, нанесенные плазменным вакуумно-дуговым напылением на Cu-Be сплав С17200

Александр Колубаев^{1, a, *}, Ольга Сизова^{1, b}, Юлия Денисова^{1, 2, c}, Андрей Леонов^{2, d},
 Наталья Терюкалова^{1, e}, Алексей Белый^{3, f}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

² Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, г. Томск, 634055, Россия

³ Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

^a  <https://orcid.org/0000-0002-2839-5249>,  kav@ispms.tsc.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9177-6602>,  ovs@ispms.tsc.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-3069-1434>,  yudenisova81@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>,  laa@tpu.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0001-6547-7676>,  natali.t.v@ispms.tsc.ru, ^f  <http://orcid.org/0000-0002-2207-3169>,  vmo@tut.by

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК691.735:621.793:539.621:620.183

История статьи:

Поступила: 03 сентября 2020

Рецензирование: 18 сентября 2020

Принята к печати: 28 сентября 2020

Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Ионно-плазменные покрытия

Медно-бериллиевый сплав

Рентгеноструктурный анализ

Фазы Cu-Ti

Трение скольжения

Износ

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-58-00048 Бел_а).

Благодарности:

Авторы выражают благодарность В.В. Денисову и А.В. Филиппову за помощь в проведении эксперимента.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для улучшения эксплуатационных свойств медно-бериллиевого сплава применяют метод модифицирования поверхности путем нанесения твердых интерметаллических покрытий. Возможность метода ионно-плазменного легирования широко варьировать свойствами поверхностных слоев различных сплавов, в том числе на медной основе, позволяет успешно применять его и для получения износ- и коррозионностойких покрытий на деталях из бериллиевой бронзы, работающих в условиях трения в агрессивных средах. Наиболее перспективными в этом отношении являются многофазные и многокомпонентные функциональные твердые покрытия. **Целью работы** является анализ микроструктуры, фазового состава и трибологических свойств сплавов CuBe, модифицированных плазменно-активированными PVD-покрытиями на основе титана, с последующей разработкой эффективной технологии поверхностного инжиниринга и улучшения механических свойств сплавов CuBe. **Методы.** Методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения титана и меди на закаленную бронзу BrB₂ (сплав С17200) при температуре 320...330 °С были получены многофазные покрытия, которые по данным рентгенофазового анализа состоят из меди, титана и соединений CuTi, и CuTi₂. Рентгеноструктурный анализ также показал, что в процессе ионно-плазменной обработки происходило старение медно-бериллиевого сплава с образованием частиц CuBe, что обеспечивало повышение твердости сплава. **Результаты и обсуждение.** Была изучена износостойкость бериллиевой бронзы с ионно-плазменными композиционным и градиентным покрытиями TiCu при трении скольжения. Износ образцов с покрытиями характеризовался растрескиванием и постепенным разрушением твердого поверхностного слоя с последующим изнашиванием основного медно-бериллиевого сплава. Износ подложки сопровождался отделением мелких частиц материала основы, в отличие от состаренного медно-бериллиевого сплава без покрытия, который изнашивался по адгезионному механизму с отделением крупных частиц износа. При температуре нанесения покрытий 320...330 °С их микротвердость оказалась достаточно высока и составила 530...540 HV_{0,02}. Однако износостойкость покрытий оказалась невысокой, так как тонкие покрытия (не более 8 мкм) на относительно мягкой основе не выдерживают нагрузку 20 Н при испытаниях.

Для цитирования: Многофазные покрытия Cu-Ti, нанесенные плазменным вакуумно-дуговым напылением на Cu-Be сплав С17200 / А.В. Колубаев, О.В. Сизова, Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, Н.В. Терюкалова, А.В. Белый // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 137–150. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-137-150.

Введение

Бериллиевые бронзы (бериллиевая медь), содержащие около 1,8...2,5 % Be, в связи с высокими показателями механических свойств, а также хорошей коррозионной стойкостью и электропроводностью широко применяют в

*Адрес для переписки

Колубаев Александр Викторович, д.ф.-м.н., профессор
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: +7 (382) 228-69-70, e-mail: kav@ispms.ru

аэрокосмической, нефтехимической и машиностроительной области для производства упругих элементов, зубчатых колес, опор скольжения, диафрагм, электрических контактов и т. д. [1]. В промышленных сплавах системы CuBe, как и в большинстве материалов с эффектом дисперсионного упрочнения, концентрационная область располагается возле границы максимальной растворимости основного легирующего элемента в твердом растворе и соответствует примерно 2 % содержания Be. При дальнейшем увеличении содержания бериллия прочностные свойства повышаются незначительно, а пластичность становится чрезмерно малой. Необходимые эксплуатационные свойства сплава обеспечиваются деформационной и термической обработкой, эффект упрочнения при термической обработке у них максимальный среди всех сплавов на медной основе. Они подвергаются закалке и последующему старению [2].

В зависимости от вида термообработки (закалки или закалки и старения) структура этого сплава может представлять собой как однородный твердый раствор бериллия в меди, так и двухфазную структуру, состоящую из обедненного бериллием α -твердого раствора и зон прерывистого распада в виде ультрадисперсных частиц γ' -фазы (CuBe). В результате старения в интервале температур 300...400 °C бериллиевая бронза приобретает наиболее высокие значения твердости и прочности. Бериллиевая бронза (БрБ2) обладает существенно более высокими триботехническими свойствами по сравнению с другими видами бронз (например, кремнистыми бронзами), однако ее износостойкость все-таки недостаточна для работы в узлах трения, где преобладающим механизмом изнашивания является адгезионный износ [3].

С целью улучшения износостойкости этого сплава применяют метод модифицирования поверхности, т. е. получения твердых интерметаллических покрытий за счет диффузии отдельных элементов в поверхностные слои. К числу наиболее широко применяемых твердых покрытий относятся покрытия на основе нитридов металлов [4, 5]. Имеющиеся в литературе данные указывают на способы получения покрытий титана, хрома, железа методом магнетронного распыления [6] с последующим плазменным азотированием или посредством лазерной наплавки [7].

В результате такой обработки на поверхности сплава образуются твердые многофазные слои, обеспечивающие заметное повышение триботехнических свойств бериллиевой бронзы и других медных сплавов. К этому следует добавить, что высокая износостойкость интерметаллических соединений обусловлена химическим поглощением атмосферных газов на поверхности скольжения, особенно во время процесса изнашивания [8]. Химическое поглощение молекул кислорода в области контакта вызывает образование тонкой оксидной пленки на поверхности скольжения, что обеспечивает повышение износостойкости покрытия. Вместе с тем существуют ограничения использования твердых покрытий, формируемых на относительно мягких подложках. Это обусловлено действием высоких микронапряжений на границе раздела «покрытие – металл», вызывающих отслоение покрытия при значительных внешних воздействиях [9]. Проблема совместимости твердых покрытий с пластичным металлом обычно решается путем предварительного упрочнения поверхности металла. Например, авторы работы [10] добились повышения механических и триботехнических свойств многофазных покрытий CrN / CrTiAlSiN / WCrTiAlN, нанесенных на сталь AISI 4140 после предварительной нитроцементации стальной подложки, обеспечившей отрицательный градиент твердости диффузионного карбонитридного слоя.

Сравнительные исследования процесса трения покрытий TiN и TiAlN, нанесенных на медь, быстрорежущую сталь и твердый сплав, выявили зависимость характера изнашивания от модуля упругости покрытий и твердости подложки [11]. Данные покрытия на подложках из меди и быстрорежущей стали растрескиваются при трении и отслаиваются, что может быть вызвано контактными растягивающими напряжениями и пластической деформацией подложки. При нанесении этих покрытий на подложку из твердого сплава трещины при трении не наблюдались, что указывает на положительное влияние более твердой подложки на характеристики износа ионно-плазменных покрытий. Подтверждают данный вывод результаты исследований адгезии и разрушения покрытия CrN на различных видах подложек [12], которые свидетельствуют о более высокой адгезии и несущей способно-

сти данного покрытия на подложках с большим модулем упругости. Следует отметить, что при трибологическом назначении покрытий, в том числе и покрытия TiN, адгезия является наиболее важным свойством и тесно связана со сроком службы деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

Эффективным способом снижения остаточных напряжений и повышения адгезии покрытия к подложке является создание многослойных покрытий с чередующимися слоями металла и его соединений. Так, образование промежуточного слоя Ti на медной подложке улучшает адгезионные свойства TiN, поскольку промежуточный слой Ti имеет хорошую адгезию с оксидами между подложкой и TiN [13]. Кроме того, роль промежуточного слоя титана заключается в растворении оксидного слоя, оставшегося на поверхности подложки, а также в снятии напряжения сдвига на границе раздела.

При изучении процессов трения и изнашивания твердых покрытий на сплавах меди прежде всего обращают внимание на обеспечение несущей способности покрытий. Как было отмечено выше, деформирование медной основы при трении приводит к растрескиванию и отслаиванию покрытий. Для исключения подобных негативных эффектов необходимо обеспечить повышение твердости пластичной медной подложки, что труднодостижимо в отличие от сплавов на основе железа или твердых сплавов. В работе [14] для повышения трибологических свойств бериллиевой бронзы (C17200) на поверхность образцов наносили пленку титана методом магнетронного распыления с последующей термообработкой в водородной плазме. В результате формировалось износостойкое покрытие, состоящее из соединений Cu_4Ti , Cu_3Ti_2 и $CuTi$, твердость которого оказалась значительно выше твердости исходного сплава, а коэффициент трения снизился с 0,65 для подложки без покрытия до 0,3 для подложки с покрытием. Значительное улучшение антифрикционных и триботехнических свойств бронзы C17200 было также достигнуто в результате предварительного плазменного легирования поверхности бронзы титаном с последующим плазменным азотированием [15]. Модифицированный слой состоял, таким образом, из внешнего слоя TiN/Ti_2N и внутреннего диффузионного слоя $TiCuBe$, образовавшегося в

результате взаимной диффузии атомов покрытия и подложки. Заметное повышение адгезионной прочности полученного композитного слоя обусловлено в данном случае образованием градиентного диффузионного слоя $CuTi$ между верхним нитридным слоем и подложкой. Подобные трибологические свойства и структура были получены при магнетронном напылении пленки $CuTi$ с использованием мишени из меди и титана с последующей обработкой плазменным азотированием [4]. Наличие твердого многофазного покрытия обеспечило смену механизма изнашивания – от адгезионного к абразивному.

Для улучшения механических свойств медно-алюминиевого сплава C61900 авторами работы [16] было получено многофазное покрытие, содержащее интерметаллиды на основе $TiCuAl$ и нитрид титана (Ti_2N), путем нанесения пленки Ti и последующего плазменного азотирования. В результате твердость поверхности с покрытием была увеличена до 630 $HV_{0,01}$, а твердость в поперечном сечении постепенно снижалась до твердости исходного сплава. Кроме того, скорость износа образца с покрытием снизилась на 95 % по сравнению с необработанным сплавом $CuAl$. Применение такой же технологии формирования многофазного покрытия на поверхности медно-бериллиевого сплава C17200 привело к значительному увеличению твердости. Так, плазменное азотирование при 650 °C обеспечило повышение твердости поверхности до 983 HV из-за присутствия фазы Ti_2N [5].

Наряду с комбинированным упрочнением поверхности медно-бериллиевого сплава методом нанесения тонкой металлической пленки с последующим азотированием применяют покрытия, содержащие карбиды металлов. В работе [17] композитное покрытие TaC/Ta было получено в два этапа: плазменное легирование танталом поверхности при 800 °C в течение 2 ч с последующим CVD-науглероживанием при 670 °C в течение 0,5 ч. В результате были улучшены абразивная и коррозионная стойкость сплава C17200.

Таким образом, метод ионно-плазменного легирования дает возможность широко варьировать свойствами поверхностных слоев различных сплавов, в том числе на медной основе, а также позволяет успешно применять его и для получения износ- и коррозионностойких по-

крытий на деталях из бериллиевой бронзы, работающих в условиях трения в агрессивных средах. Наиболее перспективными в этом отношении являются многофазные и многокомпонентные функциональные покрытия на основе нитридов, оксидов и карбидов металлов, представляющие собой комплекс «подложка – модифицированный поверхностный слой» с плавно изменяющимися физико-механическими характеристиками, обеспечивающими эксплуатацию в условиях минимального механохимического износа.

Анализ данных литературы свидетельствует о том, что поиск новых методов упрочнения бериллиевой бронзы и оптимизация существующих технологий являются сегодня одним из главных научных направлений в области комплексных исследований, направленных на решение фундаментальной задачи изучения закономерностей эволюции структуры и физико-механических свойств функциональных материалов с модифицированной поверхностью. Ее решение должно привести к разработке принципов формирования многокомпонентных покрытий на основе переходных металлов при совмещении ионных потоков различной физической и химической природы.

Целью работы является изучение микроструктуры, определение фазового состава и трибологических свойств ионно-плазменных покрытий на основе меди и титана, полученных вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом на бериллиевой бронзе, а также выбор оптимальных режимов технологии осаждения покрытий, обеспечивающих более высокую износостойкость по сравнению с бериллиевой бронзой без покрытий.

Методика исследований

Процессы осаждения покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом проводились на установке «КВАДРО», входящей в состав Комплекса уникальных электрофизических установок «УНИКУУМ» ИСЭ СО РАН (URL: <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/unu/unikum/unikum.html>). В эксперименте для генерации потоков металлической плазмы использовались два дуговых испарителя с цилиндрическими катодами диаметром 80 мм из титана марки ВТ1-0 и

меди марки М1, а также источник газовой плазмы с накаливаемым и полым катодом «ПИНК» [18]. Источник газовой плазмы использовался для предварительной очистки поверхности изделий от оставшихся диэлектрических, в том числе оксидных, пленок путем ионного травления ионами аргона, нагрева подложки, а также дополнительной ионизации газа и ассистирования при напылении покрытий. Для получения требуемого элементного состава покрытия TiCu подбирались соотношения токов разряда дуговых испарителей.

Перед напылением вакуумная камера с размерами около 650×650×650 мм откачивалась турбомолекулярным насосом до предельного давления 10^{-2} Па. Через плазменный источник «ПИНК» рабочее давление было установлено на уровне 0,3 Па. Образцы бериллиевой бронзы, предварительно закаленные, размером $\varnothing 5 \times 10$ мм размещались в центре камеры на держателе на уровне выходных апертур источников плазмы. При зажигании газового разряда с током около 40 А и приложении напряжения смещения величиной –600 В на держателе с образцами осуществлялась очистка и нагрев образцов до температуры 320...330 °С, соответствующей температуре старения бериллиевой бронзы, что подтвердил рентгеноструктурный анализ. В процессе очистки и нагрева поверхности образцов ионами аргона осуществлялась ее химическая активация, обеспечивающая высокую адгезию покрытия к подложке. После достижения требуемой температуры производилось зажигание разрядов в дуговых испарителях и напыление покрытия.

Осаждение композиций из титана и меди производилось в атмосфере аргона в двух режимах. В первом случае композит (Ti+Cu) напылялся при одновременной работе двух дуговых испарителей и источника газовой плазмы с токами, приведенными в табл. 1. Образцы вращались на держателе в центре камеры со скоростью, обеспечивающей последовательное осаждение слоев титана и меди толщиной до нескольких нанометров, что приводило к их перемешиванию и взаимной диффузии. Во втором режиме производили напыление композита (Ti+Cu) по следующей схеме: в начале процесса ток испарителя I с титановым катодом устанавливали равным 30 А и через каждые 20 мин увеличивали на 5 А

Параметры режимов напыления на CuBe-подложку
Parameters of the modes of deposition on a CuBe substrate

Режим напыления	Ток испарителя 1 (Ti)	Ток испарителя 2 (Cu)	Ток источника газовой плазмы	Напряжения смещения в процессе напыления	Температура обработки	Рабочий газ	Время осаждения
	I_1, A	I_2, A	I_{GAS}, A	$U_{см}, B$	$T, ^\circ C$		$t, мин$
№ 1 (композит Ti+Cu)	90	90	≈ 40	100	320...330	Ar	120
№ 2 (композит Ti+Cu)	(30...90)*	90	≈ 30	100	320...330	Ar	240

* начальный ток 30 А и каждые 20 мин добавляли по 5 А до достижения 90 А.

до достижения значения, равного 90 А. Ток испарителя 2 с медным катодом в течение всего процесса был равен 90 А. Такой режим должен был обеспечить градиент концентрации титана в композиционном покрытии.

Структуру покрытий изучали на лазерном конфокальном микроскопе LEXT OLS4000 в оптическом и лазерном режимах, а также на сканирующем электронном микроскопе Philips SEM 515 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Genesis в Томском региональном центре коллективного пользования научным оборудованием при Томском государственном университете. Структурный анализ металла образцов был выполнен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 с использованием излучения CuK_α . Фазовый состав состаренной бериллиевой бронзы определяли на стороне образца, противоположной покрытию, которая не подвергалась воздействию ионов. Для определения фазового состава покрытий использовали программу PowderCell.

Трибологические испытания образцов проводили на триботестере фирмы TRIBOtechnic (Франция) при нагрузке $P = 20$ Н и скорости скольжения $V = 0,1$ м/с в течение 4 ч. Скольжение осуществляли в воздушной среде при комнатной температуре без смазки по схеме «палец – диск», контртелом служил закаленный высокохромистый сплав 95X18 (AISI 440B) твердостью 50 HRC. Потерю массы образца Δm (г) определяли с помощью электронных весов с точностью 0,1 мг. Скорость изнашивания рассчитывали по формуле

$$I = \Delta m/t, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы образца, г; t – время испытаний, ч. Износостойкость W определяли как обратную величину скорости изнашивания

$$W = 1/I. \quad (2)$$

Измерение микротвердости покрытий осуществляли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Относительная ошибка при измерении микротвердости не превышала ± 5 %.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура и элементный состав покрытий на основе CuTi

Вид поперечного сечения образцов бериллиевой бронзы с покрытиями и элементный состав покрытий после нанесения композиций из титана и меди показан на рис. 1 и 2.

Толщина композиционного покрытия, полученного по первому режиму, составила 5...7 мкм (рис. 1). Послойный микроанализ показал примерно одинаковое распределение элементов Ti и Cu по сечению покрытия. Это обусловлено последовательным осаждением титана и меди толщиной до нескольких нанометров в процессе вращения образцов в камере, их перемешиванием и взаимной диффузией. Элементный микроанализ состава сплава под покрытием указал на присутствие в материале основы титана, который обладает определенной растворимостью в бронзе и способен диффундировать вглубь во

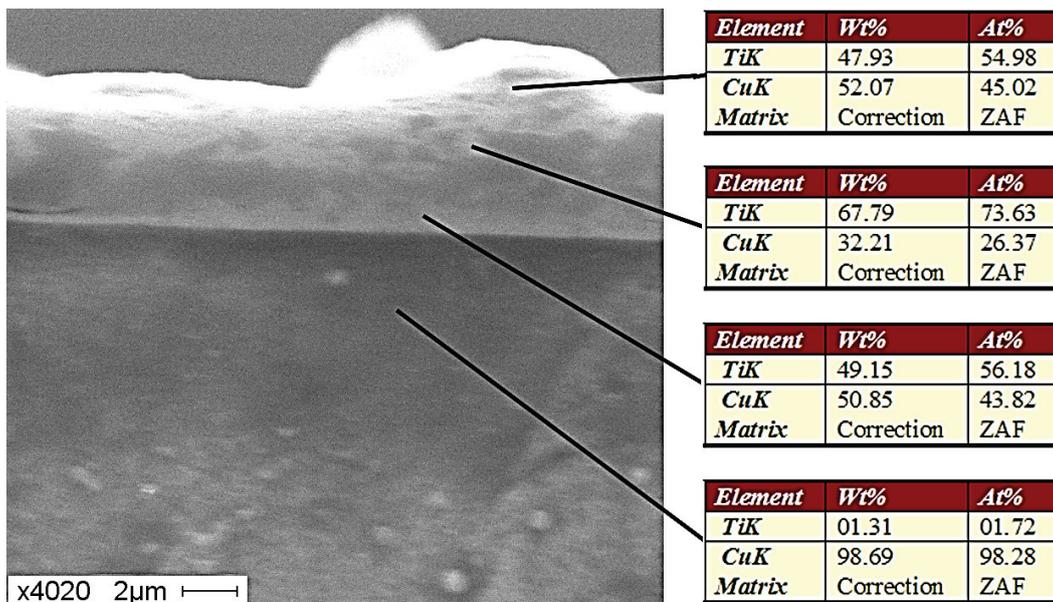


Рис. 1. Поперечное сечение бериллиевой бронзы с CuTi покрытием, полученным по первому режиму

Fig. 1. Cross section of beryllium bronze with CuTi coating obtained by the first mode

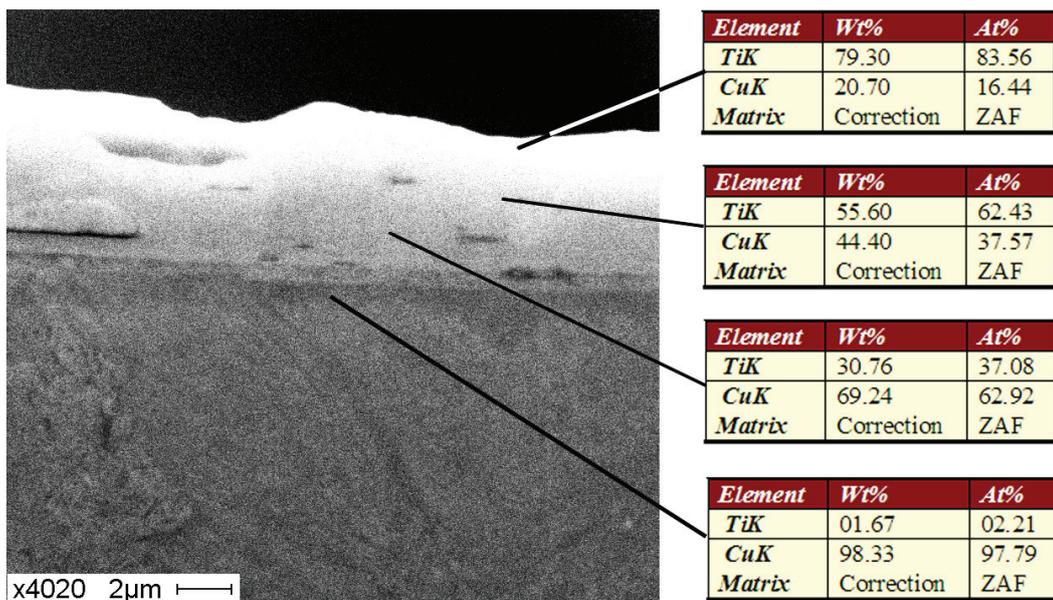


Рис. 2. Поперечное сечение бериллиевой бронзы с CuTi покрытием, полученным по второму режиму

Fig. 2. Cross section of beryllium bronze with CuTi coating obtained by the second mode

время процесса нанесения покрытия. В материале основы видны частицы CuBe, которые выделяются в процессе старения бронзы. Максимальный размер частиц составил 300 нм.

Покрытие, полученное по второму режиму, представлено на рис. 2.

Толщина композиционного покрытия, полученного по второму режиму, составила

6...8 мкм. В отличие от предыдущего случая здесь наблюдается градиентное распределение элементов по сечению покрытия, что обусловлено условиями распыления титана. В материале основы вблизи границы раздела так же, как и в первом случае, присутствует титан, который, вероятнее всего, образует твердый раствор титана в меди.

Фазовый анализ покрытий на основе CuTi

Рентгенограммы покрытий и бериллиевой бронзы после старения в вакуумной камере при температуре 320...330 °С показаны на рис. 3. На рентгенограмме состаренной бронзы присутствуют рефлексы меди и соединения CuBe. Параметр решетки меди в сплаве меньше, чем у чистой меди, и составляет 3,586 Å по сравнению с величиной 3,615 Å у меди. Такое различие обусловлено незначительным растворением бериллия в решетке меди и образованием твердого раствора бериллия в меди.

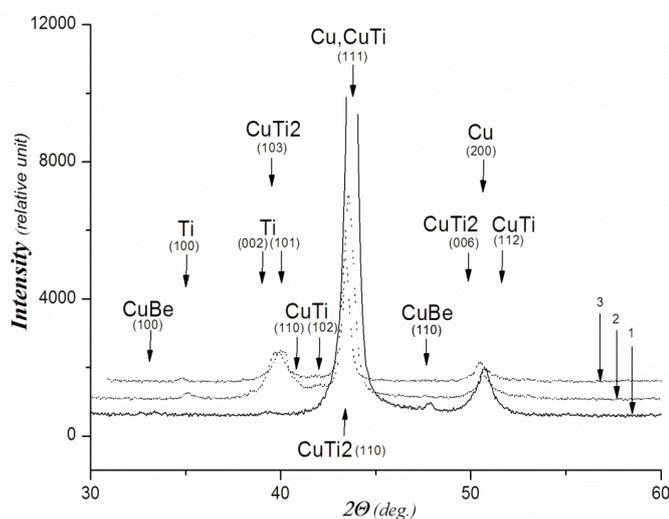


Рис. 3. Рентгенограммы CuBe сплава:

1 – состаренная бериллиевая бронза; 2 – композиционное покрытие, полученное по первому режиму; 3 – градиентное покрытие, полученное по второму режиму

Fig. 3. X-ray patterns of CuBe alloy:

1 – aged beryllium bronze; 2 – composite coating obtained by the first mode; 3 – gradient coating obtained by the second mode

Отсутствие рефлексов соединения CuBe на образцах с покрытием обусловлено малым содержанием данного соединения в бронзе и наличием покрытия, которое снижает интенсивность рентгеновского излучения.

По результатам рентгеноструктурного анализа покрытий установлено, что осаждаемые элементы формируют композиционный слой на поверхности сплава, состоящий из меди, титана и соединений CuTi, и CuTi₂. Следует отметить, что из-за небольшой толщины покрытий рефлекс меди может состоять как из отражений подложки, так из чистой меди, содержащейся в покрытии.

Для определения фазового состава покрытий была использована база данных PCPDF-WIN, а также программа анализа рентгенограмм POWDER CELL. В табл. 2 приведены результаты выполненных исследований. На рентгенограмме композиционного покрытия (2), полученного по первому режиму, присутствует большее количество меди, чем на рентгенограмме градиентного покрытия (3). Причиной этого может служить отражение от поверхности подложки из-за небольшой толщины покрытия. Градиентное покрытие имеет толщину на 1...2 мкм больше, что и обуславливает снижение отражения от подложки.

Подтверждением данного результата может служить элементный анализ поверхности градиентного покрытия, нанесенного на подложку из твердого сплава ВК8, когда образцы из бериллиевой бронзы и твердого сплава размещали в камере совместно (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что содержание меди на поверхности покрытия меньше, чем титана. То же самое наблюдали и при анализе состава гради-

Таблица 2
Table 2

Фазовый состав CuTi покрытий на бериллиевой бронзе Phase composition of CuTi coatings on beryllium bronze

Образец	Состав, мас. %				
	Cu	Ti	CuBe	CuTi	CuTi ₂
БрБ2	95,8	–	4,2	–	–
Покрытие (режим 1)	35,0	9,3	–	19,4	36,3
Покрытие (режим 2)	3,1	11,9	–	14,4	70,6

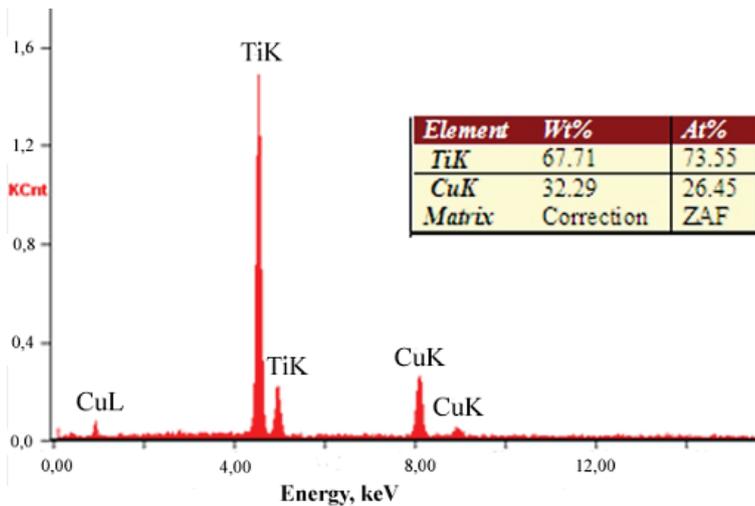


Рис. 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа композиционного покрытия CuTi на подложке из твердого сплава

Fig. 4. Results of X-ray microanalysis of CuTi composite coating on a hard alloy substrate

ентного покрытия на подложке ВК8. Очевидно, что при рентгеноструктурном анализе композиционного покрытия на бронзовой подложке имеет место совместное отражение меди с поверхности материала подложки и чистой меди, присутствующей в покрытии. Это и обуславливает высокую концентрацию меди при фазовом анализе композиционного покрытия.

Еще один факт, на который следует обратить внимание при анализе результатов нанесения покрытий, – это меньшее содержание меди на поверхности покрытий, полученных на бронзе по второму режиму, и композиционном покрытии на твердом сплаве. В обоих случаях ток испарителей на конечной стадии процесса был одинаков. В работе [19] дается объяснение этому факту. При попадании на подложку атом обменивается энергией с ранее осажденными атомами, теряет ее и образует прочные связи с атомами подложки. Если этого не происходит, то он испаряется с поверхности, чему способствует энергетическое воздействие ионов распыляемых металлов и аргона. Так как удельная теплота испарения меди (304,6 кДж/моль) меньше, чем удельная теплота испарения титана (422,6 кДж/моль), то испаряется с подложки преимущественно медь.

Измерения микротвердости

Значения микротвердости поверхностей состаренного медно-бериллиевого сплава без покрытия, с композиционным и градиентным по-

крытиями составляют 350, 540 и 530 HV_{0,02} соответственно. Более высокая твердость образцов с покрытиями обусловлена образованием твердых соединений CuTi и CuTi₂. Поскольку толщина покрытий всего несколько микрометров, то измеренная твердость не отражает истинную твердость покрытий, так как индентор продавливает покрытие.

Трибологическое поведение образцов с покрытиями CuTi

Зависимость коэффициентов трения бериллиевой бронзы с покрытиями от времени испытаний показана на рис. 5. Коэффициенты трения покрытий резко возрастают в течение 20 мин, что отражает время приработки. Затем коэффициенты трения ведут себя неодинаково. Коэффициент трения композиционного покрытия в течение 15 мин остается равным ~0,27, по истечении этого времени быстро достигает значения 0,4, далее постепенно возрастает до 0,46 и колеблется около этого значения до конца испытаний. Коэффициент трения градиентного покрытия растет от значения 0,27 до 0,46 в течение полутора часов.

Зависимость коэффициента трения от времени указывает на различную интенсивность разрушения исследованных покрытий. Так, по сравнению с композиционным покрытием градиентное покрытие показало более высокую стойкость. Оно разрушилось через 100 мин, тогда как композиционное покрытие разрушилось через 40 мин испытаний. Несмотря на более высокую твердость, являющуюся эффективным показателем износостойкости, эксплуатационные свойства покрытий при выбранной нагрузке 20 Н оказались невысокими из-за их малой толщины.

После разрушения покрытий коэффициент трения становится равным коэффициенту трения состаренной бериллиевой бронзы, который, как было показано в работе [20], равен ~0,46. Сравнение износостойкости состаренной бронзы и образцов с покрытиями, рассчитанной по формуле (2), показал, что состаренная бронза и бронза с композиционным покрытием имеют примерно одинаковую износостойкость – 86 ч/г. Износостойкость градиентного покрытия ока-

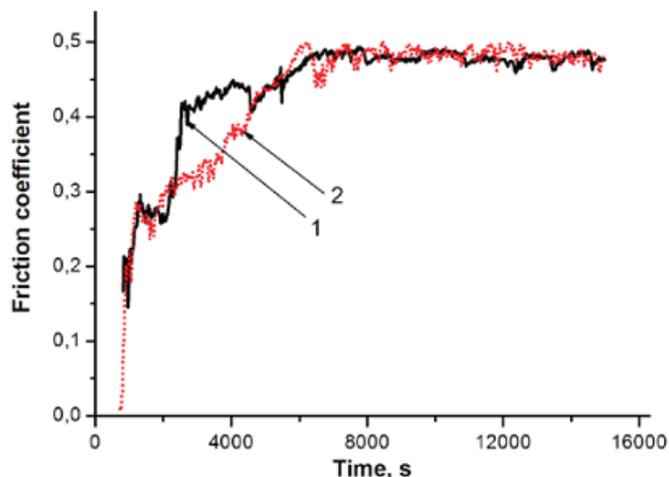


Рис. 5. Коэффициенты трения, измеренные во время испытания на износ образцов с покрытиями:

1 – композиционное покрытие; 2 – градиентное покрытие

Fig. 5. The coefficients of friction measured during the wear test on the specimens with coatings:

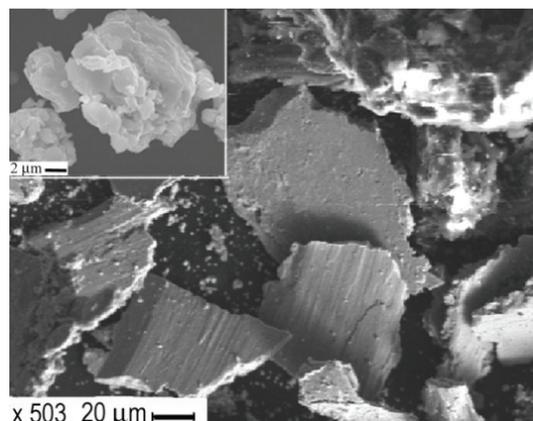
1 – composite coating; 2 – gradient coating

злась значительно выше и составила 134 ч/г. Этого следовало ожидать, так как композиционное покрытие разрушилось значительно раньше, чем градиентное.

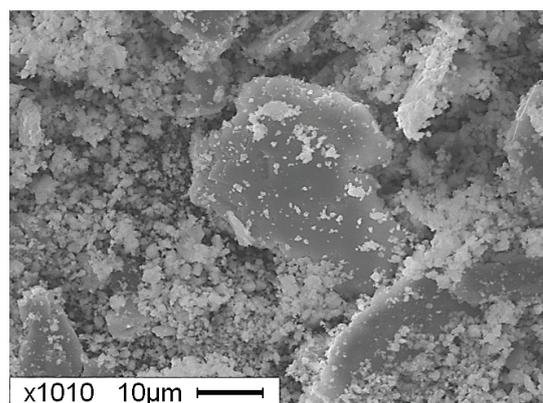
Для определения механизма изнашивания был проведен анализ морфологии частиц износа состаренной бронзы и состаренной бронзы с покрытиями, микрофотографии которых, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, показаны на рис. 6.

Ранее было показано [20], что механизм изнашивания состаренной бронзы является адгезионным. При анализе тонкой структуры частиц износа в них обнаружили следы последовательных сдвигов в микрообластях материала образца, предшествовавших их отделению от поверхности трения, что хорошо видно на вставке рис. 6, а. Изнашивание образца с градиентным покрытием осуществлялось путем разрушения и раскрашивания покрытия вследствие развития пластической деформации под тонким твердым слоем. В результате несовместности деформаций в материале основы и твердом слое происходит образование трещин (рис. 7) и разрушение покрытия, механизм которого был описан в работе [9].

Разрушение композиционного покрытия происходит практически так же, как и градиентного, так как в обоих случаях имеется тонкое твердое покрытие на более пластичной подложке.



а



б

Рис. 6. Частицы износа состаренной бронзы (а) и состаренной бронзы с градиентным покрытием (б)

Fig. 6. Wear particles of aged bronze (a) and aged bronze with gradient coating (b)

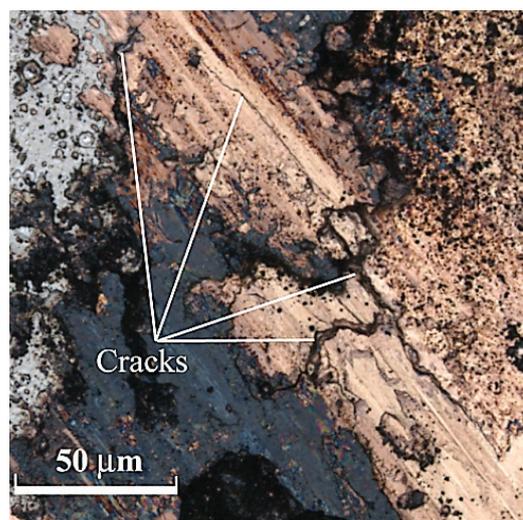


Рис. 7. Образование трещин в покрытии при трении

Fig. 7. Cracks formation in the coating during friction

Микрорентгеноспектральный анализ частиц износа покрытий показал, что крупные частицы содержат титан и медь. Частицы малого размера состоят из медно-бериллиевого сплава с частицами железа, которые отделились от контртела.

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что покрытия, полученные осаждением меди и титана на медно-бериллиевый сплав (17200), состоят из меди, титана и соединений CuTi , и CuTi_2 . При температуре нанесения покрытий 320...330 °С закаленная бериллиевая бронза становится состаренной. Твердость состаренных образцов заметно превышала твердость образцов после закалки (350 и 80 HV соответственно), что обусловлено упрочнением материала в результате старения α -твердого раствора вследствие выделения твердых частиц CuBe . Твердость поверхности образцов с интерметаллическим покрытием TiCu достигла величины 540 $\text{HV}_{0,02}$, что намного выше, чем у подложки. Триботехнические испытания образцов с покрытиями и анализ морфологии частиц износа показали, что изнашивание покрытий в основном связано с пластической деформацией материала подложки. Деформация материала подложки приводит к образованию трещин и разрушению покрытия вследствие несовместности деформаций в твердом слое и материале основы. При выбранной нагрузке 20 Н износостойкость относительно тонких покрытий (не более 8 мкм) оказалась невысокой. Можно предположить, что при малых нагрузках при работе в условиях граничного трения данные покрытия будут обладать более высокой износостойкостью.

Список литературы

1. Тебякин А.В., Фоканов А.Н., Подуражная В.Ф. Многофункциональные медные сплавы // Труды ВИАМ. – 2016. – № 12 (48). – С. 37–44. – DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-5-5.
2. Effects of cold working and heat treatment on microstructure and wear behaviour of Cu-Be alloy C17200 / A. Khodabakhshi, V. Abouei, N. Mortazavi, S.H. Razaavi, H. Hooshyar, M. Esmaily // Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces. – 2015. – Vol. 9, iss. 3. – P. 118–127. – DOI: 10.1080/17515831.2015.1107257.
3. Dry sliding wear of Cu-Be alloys / G. Straffellini, L. Maines, M. Pellizzari, P. Scardi // Wear. –

2005. – Vol. 259. – P. 506–511. – DOI: 10.1016/j.wear.2004.11.013.

4. Surface modification of C17200 copper-beryllium alloy by plasma nitriding of Cu-Ti gradient film / Y.D. Zhu, M.F. Yan, Y.X. Zhang, C.S. Zhang // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – Vol. 27, iss. 3. – P. 961–969. – DOI: 10.1007/s11665-018-3190-4.

5. Microstructure and mechanical properties of copper-titanium-nitrogen multiphase layers produced by a duplex treatment on C17200 copper-beryllium alloy / M.F. Yan, Y.D. Zhu, C.S. Zhang, Y.X. Zhang, Y.X. Wang, L. Yang // Materials and Design. – 2015. – Vol. 84. – P. 10–17. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.130.

6. High temperature plasma nitriding to modify Ti coated C17200 Cu surface: microstructure and tribological properties / Y.D. Zhu, J.W. Yao, M.F. Yan, Y.X. Zhang, Y.X. Wang, Y. Yang, L. Yang // Vacuum. – 2018. – Vol. 147. – P. 163–171. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.10.011.

7. Improving wear resistance of pure copper by laser surface modification / M. Li, M. Chao, E. Liang, J. Yu, J. Zhang, D. Li // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 258. – P. 1599–1604. – DOI: 10.1016/j.apusc.2011.10.006.

8. Improving the tribological behavior of copper through novel Ti-Cu intermetallic coatings / M.R. Bateni, F. Ashrafzadeh, J.A. Szpunar, R.A.L. Drew // Wear. – 2002. – Vol. 253. – P. 626–639. – DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00143-6.

9. Сдвиговая пластическая деформация и износостойкость ионно-модифицированных материалов с твердыми слоями / А.В. Белый, В.А. Кукареко, В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 51–57.

10. Microstructure, adhesion and tribological properties of CrN/CrTiAlSiN/WCrTiAlN multilayer coatings deposited on nitrocarburized AISI 4140 steel / Y. Li, Q. Ye, Y. Zhu, L. Zhang, Y. He, S. Zhang, J. Xiu // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 362. – P. 27–34. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.091.

11. Huang X., Etsion I., Shao T. Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN and TiAlN coating systems // Wear. – 2015. – Vol. 338–339. – P. 54–61. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.05.016.

12. Evaluation of the adhesion and failure mechanism of the hard CrN coatings on different substrates / X. Zhang, X.-B. Tian, Z.-W. Zhao, J.-B. Gao, Y.-W. Zhou, P. Gao, Y.-Y. Guo, Z. Lv // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 364. – P. 135–143. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.059.

13. Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings / G.S. Kim, S.Y. Lee, J.H. Hahn, B.Y. Lee, J.G. Han, J.H. Lee,



S.Y. Lee // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 171, iss. 1–3. – P. 83–90. – DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00243-3.

14. Microstructure and mechanical properties of multiphase layer formed during thermo-diffusing of titanium into the surface of C17200 copper–beryllium alloy / L. Yang, F.Y. Zhang, M.F. Yan, M.L. Zhang // *Applied Surface Science* – 2014. – Vol. 292. – P. 225–230. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.121.

15. Wear resistance of TiN(Ti2N)/Ti composite layer formed on C17200 alloy / L. Liu, H.H. Shen, X.Z. Liu, Q. Guo, T.X. Meng, Z.X. Wang, H.J. Yang, X.P. Liu // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 388. – P. 103–108. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.059.

16. Combining thermo-diffusing titanium and plasma nitriding to modify C61900 Cu-Al alloy / M.F. Yan, Y.D. Zhu, Y.X. Zhang, M.L. Zhang // *Vacuum*. – 2016. – Vol. 126. – P. 41–44. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.01.015.

17. Corrosion behavior of TaC/Ta composite coatings on C17200 alloy by plasma surface alloying and CVD

carburizing / W. Xi, W. Ding, S. Yu, N. Lin, T. Meng, Q. Guo, X. Liu, X. Liu // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 359. – P. 426–432. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.074.

18. Plasma generation in a pulsed mode of a non-self-sustained arc discharge with a hybrid hot-and-hollow cathode / V.V. Denisov, Yu.Kh. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalskii, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev // *Russian Physics Journal*. – 2019. – Vol. 62. – P. 541–546. – DOI: 10.1007/s11182-019-01743-7.

19. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Интегральные схемы: учебник для бакалавриата и магистратуры / под ред. Ю.В. Гуляева. – М.: Юрайт, 2018. – 460 с. – ISBN 978-5-534-03170-6.

20. The effect of microstructure on a beryllium bronze wear / O.V. Sizova, A.V. Kolubaev, A.V. Filippov, N.V. Teryukalova, Yu.A. Denisova // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2167, iss. 1. – P. 020338-1–020338-4. – DOI: 10.1063/1.5132205.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Multiphase Cu-Ti Coatings coated by Plasma Vacuum-Arc deposition on Cu-Be Alloy C17200

Alexander Kolubaev^{1, a, *}, Olga Sizova^{1, b}, Yuliya Denisova^{1, 2, c}, Andrey Leonov^{2, d},
Natalya Teryukalova^{1, e}, Aleksey Byeli^{3, f}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

²Institute of High Current Electronics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/3, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

³Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosty Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus

^a <https://orcid.org/0000-0002-2839-5249>, kav@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9177-6602>, ovs@ispms.tsc.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-3069-1434>, yudenisova81@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>, laa@tpu.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0001-6547-7676>, natali.t.v@ispms.tsc.ru, ^f <http://orcid.org/0000-0002-2207-3169>, vmo@tut.by

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 03 September 2020

Revised: 18 September 2020

Accepted: 28 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Ion-plasma coatings
Copper-beryllium alloy
X-ray diffraction
Cu-Ti Phases
Sliding friction
Wear

Funding

This work was financially supported by Russian Foundation for Basic Research (project № 20-58-00048 Bel_a).

Acknowledgements

The authors wish to thank V.V. Denisov and A.V. Filippov for his help in conducting the experiment.

ABSTRACT

Introduction. Deposition of hard intermetallic coatings is an efficient technology to improve operating characteristics of Cu-Be alloys. PVD of coatings is widely used for surface engineering of constructive materials, deposition of wear and corrosion resistant surface layers. Multiphase and multicomponent coatings are considered as the most efficient hard coatings for surface engineering. In this research, Ti-Cu coatings are deposited by a vacuum-arc plasma-assisted method on hardened BrB₂ bronze (alloy C17200) at a temperature of 320 – 330 °C. Processing resulted in ageing of Cu-Be alloy and surface hardening of material. **The aim of the research** is to analyze the microstructure, phase composition, and tribological properties of Cu-Be alloys modified with plasma-activated PVD coatings based on titanium, with the subsequent development of an effective technology for surface engineering and improvement of the mechanical properties of Cu-Be alloys. **Results and discussion.** Plasma-assisted PVD of Cu-Ti coatings on the surface of tempered C17200 alloy at 320 – 330 °C resulted in formation of multiphase coatings, consisting of Cu, Ti, CuTi and CuTi₂ components. X-ray analysis revealed development of ageing process in Cu-Be alloy which resulted in formation of CuBe inclusions. Wear resistance of modified blocks is investigated. The main mechanism of modified blocks wearing is cracking of the coating with further formation of fine debris of base Cu-Be material. Wear debris is significantly smaller than debris of C17200 alloy without coating. Surface microhardness of blocks processed at 320 – 330 °C is comparatively high (540 HV_{0.02} - 530 HV_{0.02}). Wear resistance of blocks subjected to surface engineering is comparatively low probably because of small thickness of the coating (< 8 μm) and insufficient hardness of matrix material.

For citation: Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Teryukalova N.V., Byeli A.V. Multiphase Cu-Ti coatings coated by plasma vacuum-arc deposition on Cu-Be alloy C17200. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 137–150. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-137-150. (In Russian).

* Corresponding author

Kolubaev Alexanler V., D.Sc. (Engineering), Professor
Institute of Strength Physics and Materials Science
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
2/4 pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7 (382) 228-69-70, e-mail: kav@ispms.ru

References

1. Tebyakin A.V., Fokanov A.N., Podurazhnaya V.F. Mnogofunktsional'nye mednye splavy [Multifunctional copper alloys]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2016, vol. 12 (48), pp. 37–44. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-5-5.
2. Khodabakhshi A., Abouei V., Mortazavi N., Razavi S.H., Hooshyar H., Esmaily M. Effects of cold working and heat treatment on microstructure and wear behaviour of Cu-Be alloy C17200. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 118–127. DOI: 10.1080/17515831.2015.1107257.
3. Straffelini G., Maines L., Pellizzari M., Scardi P. Dry sliding wear of Cu-Be alloys. *Wear*, 2005, vol. 259, pp. 506–511. DOI: 10.1016/j.wear.2004.11.013.
4. Zhu Y.D., Yan M.F., Zhang Y.X., Zhang C.S. Surface modification of C17200 copper-beryllium alloy by plasma nitriding of Cu-Ti gradient film. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, vol. 27, iss. 3, pp. 961–969. DOI: 10.1007/s11665-018-3190-4.
5. Yan M.F., Zhu Y.D., Zhang C.S., Zhang Y.X., Wang Y.X., Yang L. Microstructure and mechanical properties of copper-titanium-nitrogen multiphase layers produced by a duplex treatment on C17200 copper-beryllium alloy. *Materials and Design*, 2015, vol. 84, pp. 10–17. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.130.
6. Zhu Y.D., Yao J.W., Yan M.F., Zhang Y.X., Wang Y.X., Yang Y., Yang L. High temperature plasma nitriding to modify Ti coated C17200 Cu surface: microstructure and tribological properties. *Vacuum*, 2018, vol. 147, pp. 163–171. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.10.011.
7. Li M., Chao M., Liang E., Yu J., Zhang J., Li D. Improving wear resistance of pure copper by laser surface modification. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 258, pp. 1599–1604. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.10.006.
8. Bateni M.R., Ashrafizadeh F., Szpunar J.A., Drew R.A.L. Improving the tribological behavior of copper through novel Ti-Cu intermetallic coatings. *Wear*, 2002, vol. 253, pp. 626–639. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00143-6.
9. Belyi A.V., Kukareko V.A., Rubtsov V.E., Kolubaev A.V. High-current density ion implantation and its influence on shear deformation and wear resistance of materials. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2002, vol. 5, iss. 1, p. 51–57. (In Russian).
10. Li Y., Ye Q., Zhu Y., Zhang L., He Y., Zhang S., Xiu J. Microstructure, adhesion and tribological properties of CrN/CrTiAlSiN/ WCrTiAlN multilayer coatings deposited on nitrocarburized AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 362, pp. 27–34. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.091.
11. Huang X., Etsion I., Shao T. Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN and TiAlN coating systems. *Wear*, 2015, vol. 338–339, pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.wear.2015.05.016.
12. Zhang X., Tian X.-B., Zhao Z.-W., Gao J.-B., Zhou Y.-W., Gao P., Guo Y.-Y., Lv Z. Evaluation of the adhesion and failure mechanism of the hard CrN coatings on different substrates. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 364, pp. 135–143. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.059.
13. Kim G.S., Lee S.Y., Hahn J.H., Lee B.Y., Han J.G., Lee J.H., Lee S.Y. Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 171, iss. 1–3, pp. 83–90. DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00243-3.
14. Yang L., Zhang F.Y., Yan M.F., Zhang M.L. Microstructure and mechanical properties of multiphase layer formed during thermo-diffusing of titanium into the surface of C17200 copper-beryllium alloy. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 292, pp. 225–230. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.121.
15. Liu L., Shen H.H., Liu X.Z., Guo Q., Meng T.X., Wang Z.X., Yang H.J., Liu X.P. Wear resistance of TiN(Ti2N)/Ti composite layer formed on C17200 alloy. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 388, pp. 103–108. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.059.
16. Yan M.F., Zhu Y.D., Zhang Y.X., Zhang M.L. Combining thermo-diffusing titanium and plasma nitriding to modify C61900 Cu-Al alloy. *Vacuum*, 2016, vol. 126, pp. 41–44. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.01.015.
17. Xi W., Ding W., Yu S., Lin N., Meng T., Guo Q., Liu X., Liu X. Corrosion behavior of TaC/Ta composite coatings on C17200 alloy by plasma surface alloying and CVD carburizing. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 359, pp. 426–432. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.074.

18. Denisov V.V., Akhmadeev Yu.Kh., Koval N.N., Kovalskii S.S., Pedin N.N., Yakovlev V.V. Plasma generation in a pulsed mode of a non-self-sustained arc discharge with a hybrid hot-and-hollow cathode. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, pp. 541–546. DOI: 10.1007/s11182-019-01743-7.

19. Gulyaev Yu.V., ed. *Osnovy konstruirovaniya i tekhnologii proizvodstva radioelektronnykh sredstv. Integral'nye skhemy* [Fundamentals of design and production technology of radio-electronic devices. Integrated circuits]. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 460 p. ISBN 978-5-534-03170-6.

20. Sizova O.V., Kolubaev A.V., Filippov A.V., Teryukalova N.V., Denisova Yu.A. The effect of microstructure on a beryllium bronze wear. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2167, iss. 1, pp. 020338-1–020338-4. DOI: 10.1063/1.5132205.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние механоактивации порошковой смеси на структуру и свойства бороалитированных малоуглеродистых сталей

Павел Гуляшинов^{1, а, *}, Ундрах Мишигдоржийн^{2, 3, б}, Николай Улаханов^{3, с}

¹ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

² Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

³ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская, 40в, г. Улан-Удэ, 670013, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-6776-9314>,  gulpasha@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>,  undrakh@ipms.bscnet.ru,

^с  <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>,  nulahanov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669-15:621.793.6

История статьи:

Поступила: 03 сентября 2020

Рецензирование: 11 сентября 2020

Принята к печати: 29 октября 2020

Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Химико-термическая обработка (ХТО)

Механоактивация

Бороалитирование

Карбид бора

Алюминий

Углеродистая сталь

Легированная сталь

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского Научного Фонда (проект № 19-79-10163).

АННОТАЦИЯ

Введение. Бороалитирование является одним из эффективных способов повышения эксплуатационных свойств (коррозионная стойкость, жаро- и износостойкость) низкоуглеродистых сталей. Твердофазные способы химико-термической обработки (ХТО) проводят из насыщающих смесей на основе порошковых материалов. Предварительная механоактивация данных порошков является одним из способов повышения свойств получаемого диффузионного слоя. **Цель настоящей работы** заключается в установлении влияния предварительной механоактивации порошковой смеси на структуру и свойства бороалитированного слоя на поверхности малоуглеродистых сталей. **В работе рассмотрены** результаты исследований по предварительной механоактивации насыщающей смеси при ХТО малоуглеродистых сталей (на примере Ст3 и 3Х2В8Ф) на основе порошкообразных карбида бора и алюминия. Показаны результаты проведенных экспериментов по предварительной механоактивации насыщающей смеси, установлена зависимость размеров частиц исходной смеси от продолжительности механоактивации. Получены образцы сталей с диффузионным слоем после ХТО. Установлено, что температура процесса оказывает значительное влияние на толщину полученных слоев. При увеличении температуры с 950 до 1050 °С на Ст3 толщина слоя возрастает с 120 до 150 мкм, на 3Х2В8Ф – с 105 до 140 мкм при времени выдержки 2 и 4 ч соответственно. Исследована микроструктура полученных образцов, показаны диаграммы распределения микротвердости от глубины диффузионных слоев. Установлено распределение Al по глубине полученного бороалитированного слоя. В качестве дополнительных исследований изучена насыщающая способность смеси после однократного применения в процессе ХТО. **Результаты и обсуждение.** Установлена принципиальная возможность применения механоактивации при ХТО для получения диффузионных слоев с заданными прочностными характеристиками. Увеличение продолжительности и температуры ХТО в механоактивированных смесях приводит к повышению содержания алюминия в слое.

Для цитирования: 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.

Введение

Одной из актуальных проблем современного материаловедения является повышение прочности и износостойкости деталей машин и ин-

струментов за счет диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами. Химико-термической обработкой (ХТО) деталям можно придать ряд эксплуатационных свойств, которых невозможно достичь термической обработкой (закалкой). Также ХТО применяется, когда детали экономически невыгодно изготавливать из дорогих специальных сталей и сплавов [1, 2].

Существуют различные методы ХТО: в газах, жидкостях, порошках и пастах. К достоинствам

*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.: +7 (3012) 43-36-76, e-mail: gulpasha@mail.ru

обработки в пастах необходимо отнести: низкий расход насыщающих смесей; отсутствие необходимости контроля атмосферы в печах; возможность совмещения ХТО с закалкой; наличие условий, способствующих осуществлению обработки различных частей сложных деталей [3, 4]. В случае с борированием наибольшее распространение получили насыщающие смеси на основе карбида бора, в качестве дополнительных легирующих элементов используют алюминий, хром, титан и др.

Обычно механоактивацией называют активирование твердых веществ их механической обработкой. При измельчении в ударном и ударно-стирающем режимах происходит накопление структурных дефектов, увеличение кривизны поверхностей, фазовые превращения и даже аморфизация кристаллов, что положительно влияет на их химическую активность [5–12].

В последнее время наибольший интерес у исследователей вызывает влияние механоактивации насыщающих смесей на свойства и размеры диффузионных слоев. В работах [13–18] показано положительное влияние механоактивированных смесей для последующего процесса ХТО и других процессов поверхностной обработки. Отмечено, что после обработки увеличивается макро- и микротвердость, прочность при сжатии, а также гомогенность образованных слоев твердых карбидов.

Ранее авторами работ [19, 20] была подобрана насыщающая смесь для бороалитирования из обмазок следующего состава: B_4C 78 %, Al 18 %, NaF 4 %. Установлено, что обработка данным составом приводит к формированию боридных и алюминидных фаз на поверхности углеродистых и легированных сталей. При этом, регулируя температурно-временные параметры процесса, можно реализовать различные структурно-фазовые состояния слоев: с преимущественным борированием или алитированием, со слоистой или гетерогенной микроструктурой.

Методика исследований

Механоактивации подвергались порошкообразные материалы: карбид бора B_4C марки F-220, алюминиевый порошок марки ПА-4 (ГОСТ 6058–73), натрий фтористый NaF ЧДА (ГОСТ 4463–76).

Механоактивация смеси проводилась в планетарной шаровой мельнице АГО-2, которая

предназначена для быстрого сверхтонкого измельчения сверхтвердых порошковых материалов, получения субмикронных и нанопорошков и механоактивации материалов. Мельница АГО-2 имеет два барабана объемом 100 мл, она используется для измельчения различных (в том числе сверхтвердых) порошковых материалов в лабораторных и полупромышленных условиях.

Процессы ХТО в порошках проводились в лабораторной печи ПМ-16П-ТД при температурах 950 и 1050 °С. ХТО подверглись образцы из сталей Ст3 и 3Х2В8Ф размером 20×20×10 мм. Продолжительность процесса обработки составляла 2 и 4 ч соответственно. Сталь Ст3 применяется в несущих элементах сварных и несварных конструкций и деталей (состав, в % (весовых): Fe ≈ 97, С 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, С 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, Мо до 0,5). Механоактивированная смесь засыпалась в тигель вместе с исследуемыми образцами, далее тигель упаковывался и герметизировался сверху плавким затвором для герметизации. Охлаждение тиглей проводилось на открытом воздухе при комнатной температуре. Далее тигли вскрывались, образцы зачищались от остатков насыщающей смеси.

Размеры частиц определялись с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6510LV JEOL (Япония) с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments (Великобритания) в Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления».

Фазовые составы смеси до и после механоактивации определялись с помощью рентгеновского дифрактометра D8 ADVANCE фирмы Bruker AXS в медном излучении с интервалом съемки 10...70°.

Определение микротвердости насыщенных слоев выполнялось микротвердомером 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 ми-

кроскопа METAM PB-34 с цифровой камерой Altami Studio (Россия). Для определения толщины слоя использовали программный комплекс Nexsys ImageExpert Pro 3.0.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследования механоактивации подверглись образцы исходной насыщающей смеси состава V_4C_7 78 %, Al 18 %, NaF 4 %. Время обработки смеси варьировалось от 5 до 30 мин. На рис. 1 представлен график влияния времени механоактивации (измельчения) на размер (среднее значение) частиц насыщающей смеси. Наибольшее измельчение порошков достигается после 10 мин обработки. С увеличением длительности измельчения эффективность механоактивации снижается.

Исходная смесь и смесь после механоактивации были направлены на РФА. На рис. 2, а показана рентгенограмма исходной смеси. В образцах насыщающих смесей после механоактивации от 10 до 25 мин выявлен переход алюминия и фторида натрия в аморфную форму, о чем свидетельствуют так называемые аморфные гало в диапазоне углов $43...46^\circ$ (рис. 2, б).

На следующем этапе исследований проводился процесс ХТО на образцах стали Ст3 и

3Х2В8Ф при температуре 950 и 1050 °С с выдержкой 2 и 4 ч при каждой температуре.

На рис. 3, а показана диаграмма распределения микротвердости по глубине при температуре обработки 950 °С и времени выдержки 2 ч. Толщина диффузионного слоя на обеих сталях сопоставима и составила 60 мкм. Максимальная микротвердость для стали Ст3 наблюдается на поверхности слоя и достигает 325 HV. На стали 3Х2В8Ф максимальное значение (370 HV) наблюдается на глубине 120 мкм от поверхности, вероятно, в зоне с высокой концентрацией карбидов. В целом профили микротвердости в диффузионном слое на обеих сталях претерпевают значительные колебания, причем максимумы и минимумы значений обратно пропорциональны друг другу (рис. 3, а). После четырехчасовой выдержки толщина диффузионного слоя возросла до 90 мкм на стали Ст3 и до 65 мкм на стали 3Х2В8Ф. Максимальная микротвердость и профиль ее распределения на стали Ст3 сопоставимы с двухчасовой выдержкой. Микротвердость легированной стали возросла до 420 HV в слое и до 530 HV на глубине 120 мкм от поверхности (рис. 3, б). После всех временных режимов (2 и 4 ч) на глубине 180 мкм и ниже в основном металле не наблюдается значительных колебаний микротвердости, значения составляют для

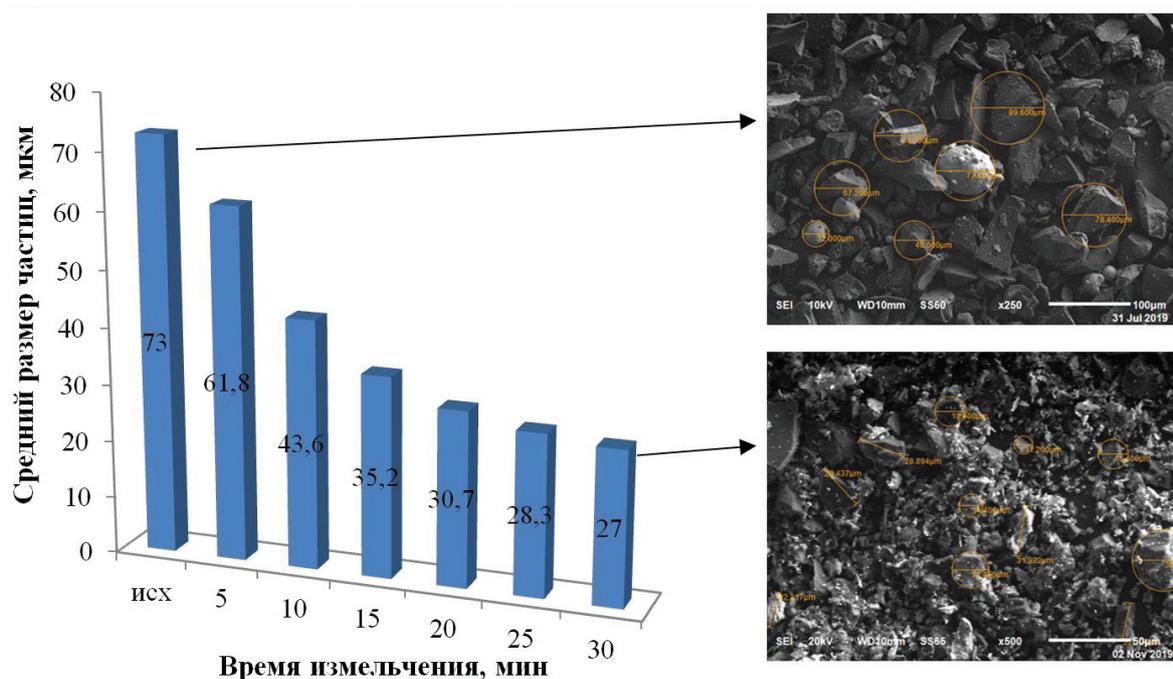


Рис. 1. Влияние длительности механоактивации на размер частиц

Fig. 1. Effect of mechanical activation duration on particle size

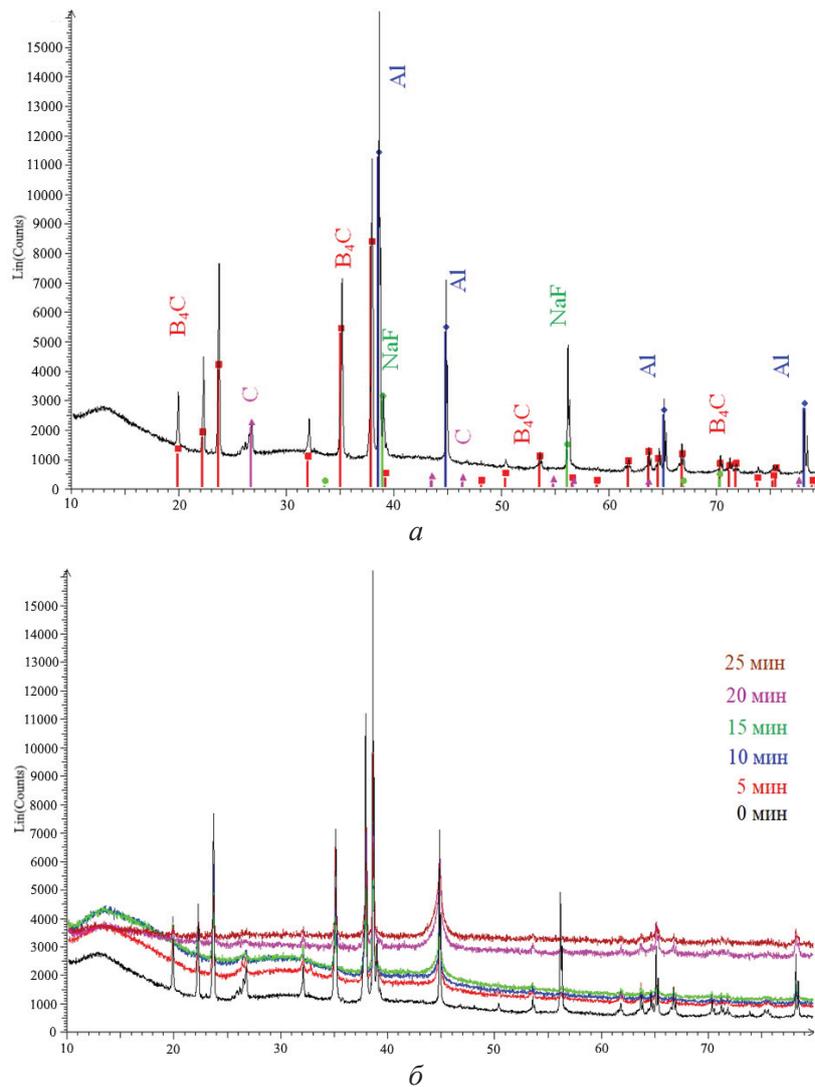


Рис. 2. Рентгенограммы исходной смеси (а) и после механоактивации в течение 5...25 мин (б)

Fig. 2. XRD-pattern of the initial mixture (a) and after mechanical activation for 5 to 25 minutes (b)

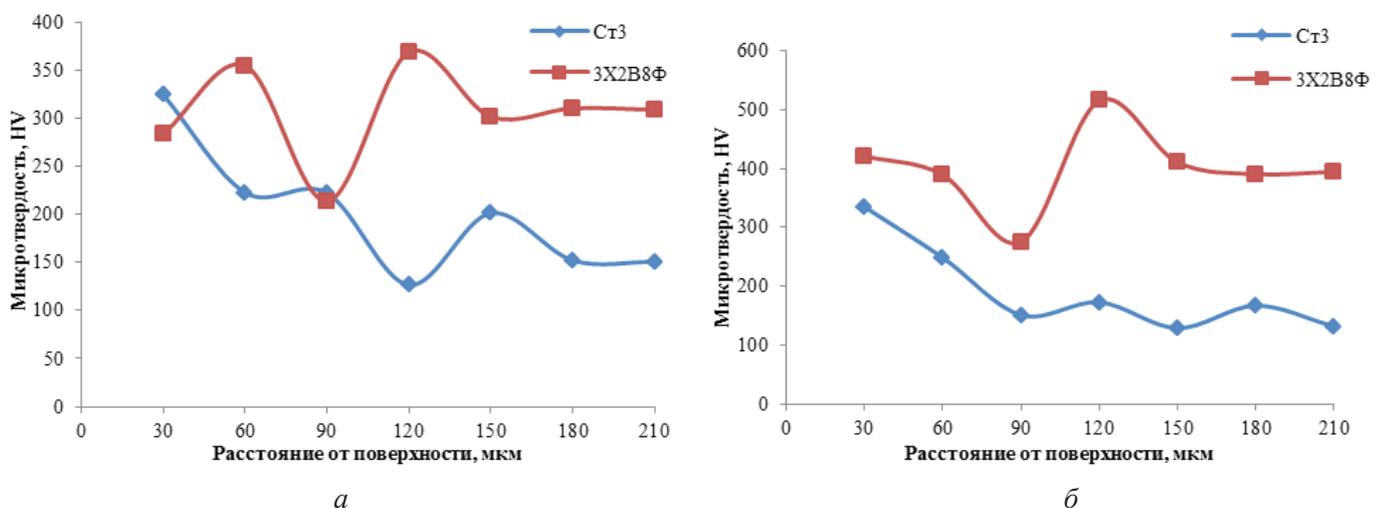


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине слоя после ХТО при 950 °С в течение 2 ч (а) и 4 ч (б)

Fig. 3. The distribution of the microhardness over the layer depth after TCT at 950 °C for 2 hours (a) and 4 hours (b)

стали Ст3 140...170 HV и для стали 3X2B8Ф 350...400 HV.

Диаграмма распределения микротвердости после ХТО при температуре 1050 °С и времени выдержки 2 ч представлена на рис. 4, а. Толщина диффузионного слоя на стали Ст3 составила 120 мкм, для стали 3X2B8Ф – 105 мкм. Отступ от внешнего края – 25 мкм. Необходимо отметить, что с увеличением температуры до 1050 °С проявляется так называемый краевой эффект, когда кромки образца имеют очень высокую твердость, но при этом повышенную хрупкость.

Увеличение продолжительности процесса ХТО до 4 ч оказывает положительное влияние на толщину диффузионного слоя. Так, на образце Ст3 она составила 150 мкм, а на стали 3X2B8Ф – 140 мкм. Отступ от внешнего края – 30 мкм. Распределение микротвердости показано на рис. 4, б. При данных параметрах ХТО также проявился краевой эффект со значительным выкрашиванием кромок образца, что может свидетельствовать о высокой концентрации хрупких фаз, предположительно, боридов или алюминидов железа в поверхностных слоях.

Профиль микротвердости на легированной стали после обеих выдержек сопоставим. Минимумы на кривых наблюдаются на глубине 90 и 150 мкм от поверхности в диффузионном слое и, вероятно, соответствуют зоне твердых растворов алюминия и углерода в железе соответственно [19]. Профиль микротвердости на стали Ст3 более равномерный после короткой выдержки. При этом твердость в слое после четырехчасо-

вой выдержки превосходит более чем в 2 раза значения после двухчасового ХТО.

Интерес вызывают полученные диаграммы распределения микротвердости на образце стали 3X2B8Ф. На данных диаграммах присутствует характерное увеличение микротвердости на глубине 120 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 диффундирующими с поверхности бором и алюминием. Вытеснение карбидов в глубь основного металла связано с их взаимной нерастворимостью с боридами [21].

Таким образом, максимальная микротвердость для стали Ст3 составила 800 HV после ХТО при 1050 °С в течение 4 ч, для стали 3X2B8Ф – 1025 HV после ХТО при 1050 °С в течение 2 ч.

Были исследованы образцы обработанных сталей на содержание Al в диффузионном слое и переходных зонах. На рис. 5, а, б показано распределение Al для Ст3 и 3X2B8Ф соответственно. Из диаграмм видно, что увеличение температуры процесса ХТО до 1050 °С оказывает значительное влияние на содержание алюминия в диффузионных слоях и глубину проникновения. Например, максимальная концентрация алюминия свыше 50 % (весовых) наблюдается после высокотемпературной ХТО в течение 4 ч. По данному показателю механоактивированные

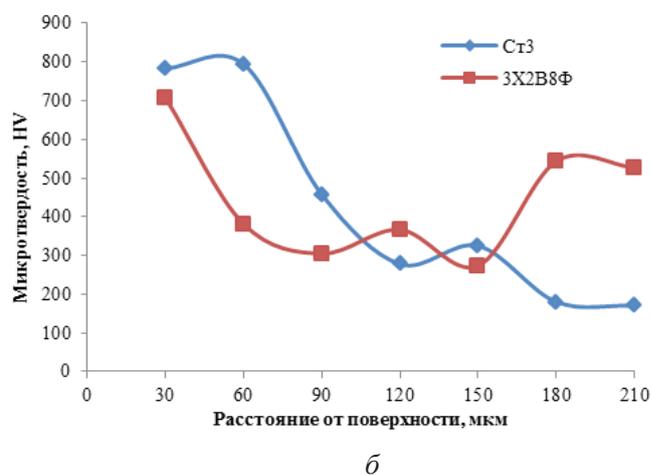
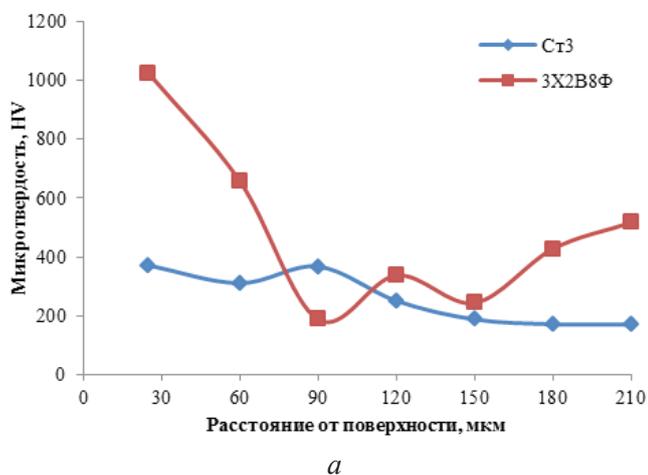


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине слоя после ХТО при 1050 °С в течение 2 ч (а) и 4 ч (б)
Fig. 4. The distribution of the microhardness over the layer depth after TCT at 1050 °С for 2 hours (a) and 4 hours (b)

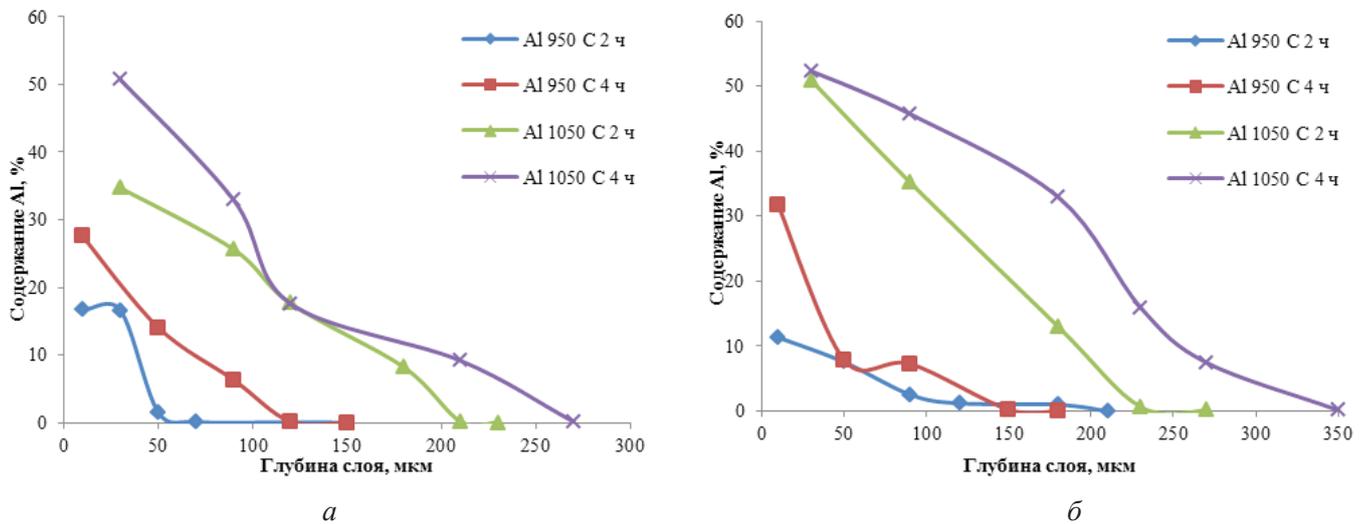


Рис. 5. Распределение алюминия по глубине слоя для стали Ст3 (а) и 3Х2В8Ф (б)

Fig. 5. The distribution of aluminum over the layer depth for steel St3 (a) and 3Kh2V8F (b)

смеси превосходят неактивированные аналоги. Известно, что при ХТО в последних смесях максимальная концентрация алюминия при 1050 °С достигает 17,5 % (весовых) на стали 3Х2В8Ф и 11 % (весовых) на стали Ст3 [19, 20]. При этом содержание алюминия после ХТО при 950 °С сопоставимо для обеих смесей.

Сравнительный анализ микроструктур образцов после ХТО в смесях до и после механоактивации при 950 и 1050 °С в течение 4 ч показал, что строение сталей можно разделить на три зоны в зависимости от расстояния от поверхности: 1 – диффузионный слой, 2 – переходная зона, 3 – основной металл (рис. 6, 7). Обработка в обоих типах смесей при 950 °С привела к формированию диффузионного слоя, состоящего из алюминидов железа в виде протяженной светлой зоны и боридной цепочки в переходной зоне. Помимо этого на поверхности слоя различима тонкая прослойка хрупкой фазы. Известно, что в результате бороалитирования при данной температуре на низкоуглеродистых сталях формируются бориды Fe2В [4]. Толщина слоя различается в зависимости от типа смеси. Так, на стали Ст3 значения соотносятся как 125 к 90 мкм соответственно до и после механоактивации; на стали 3Х2В8Ф толщина слоя соотносится как 115 к 65 мкм соответственно.

Увеличение температуры ХТО до 1050 °С привело к формированию диффузионных слоев с различной морфологией в зависимости от типа смеси. Так, морфология слоев после ХТО в ме-

ханоактивированных смесях имеет схожее слоистое строение, как в случае с ХТО при 950 °С (рис. 7, б, з). Совершенно иное строение слоя наблюдается после ХТО в смесях без механоактивации (рис. 7, а, в). Данный тип слоя имеет сложную гетерогенную морфологию. Более подробно строение, состав и свойства данного типа слоев описаны в работах [19, 20]. Диффузионные слои после ХТО в механоактивированных смесях значительно уступают по толщине слоям после ХТО без механоактивации, значения соотносятся для стали Ст3 как 150 к 650 мкм, для стали 3Х2В8Ф как 140 к 850 мкм соответственно.

Очевидно, что разница в толщине слоя на сталях связана с исходным состоянием порошка перед ХТО. Должно быть, активация алюминия более вероятна, чем активация карбида бора в процессе измельчения. Данный процесс требует дальнейшего изучения.

В качестве дополнительных исследований был проведен РФА насыщающей смеси после ХТО. Установлено, что после процесса ХТО в смеси образуется фаза FeВ и остаточный В₄С (рис. 8).

Наиболее вероятной причиной образования FeВ в насыщающей смеси после ХТО является частичный перенос Fe из мелющих тел (стальные шарики) при механоактивации, а также взаимодействие смеси с внутренней поверхностью тигля, который был изготовлен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Вклад отделившихся частиц из мелющих тел в формирование бориды железа

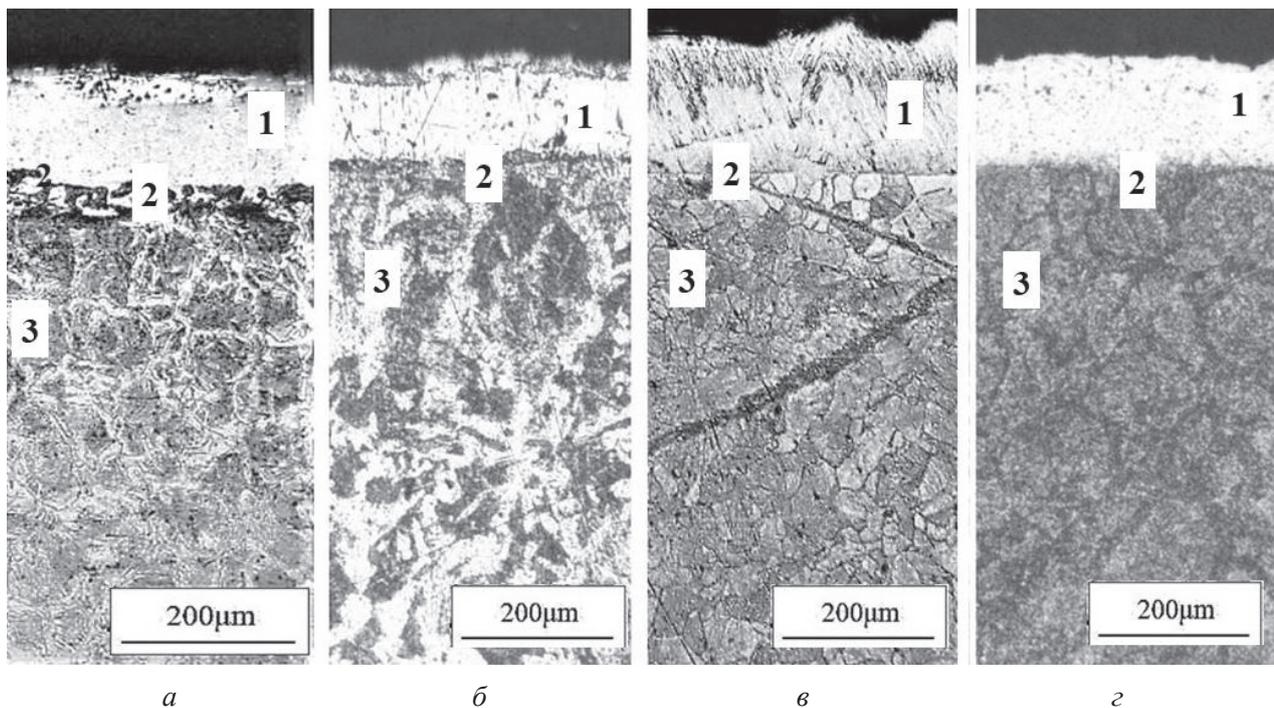


Рис. 6. Микроструктуры сталей после ХТО при температуре 950 °С, 4 ч:

a – Ст3 без МА; *б* – Ст3 после МА; *в* – 3Х2В8Ф без МА; *г* – 3Х2В8Ф после МА (МА – механоактивация)

Fig. 6. Microstructures of steels after TCT at a temperature of 950 °C for 4 h:

a – St3 without MA; *б* – St3 after MA; *в* – 3Kh2V8F without MA; *г* – 3Kh2V8F after MA (MA – mechanical activation)

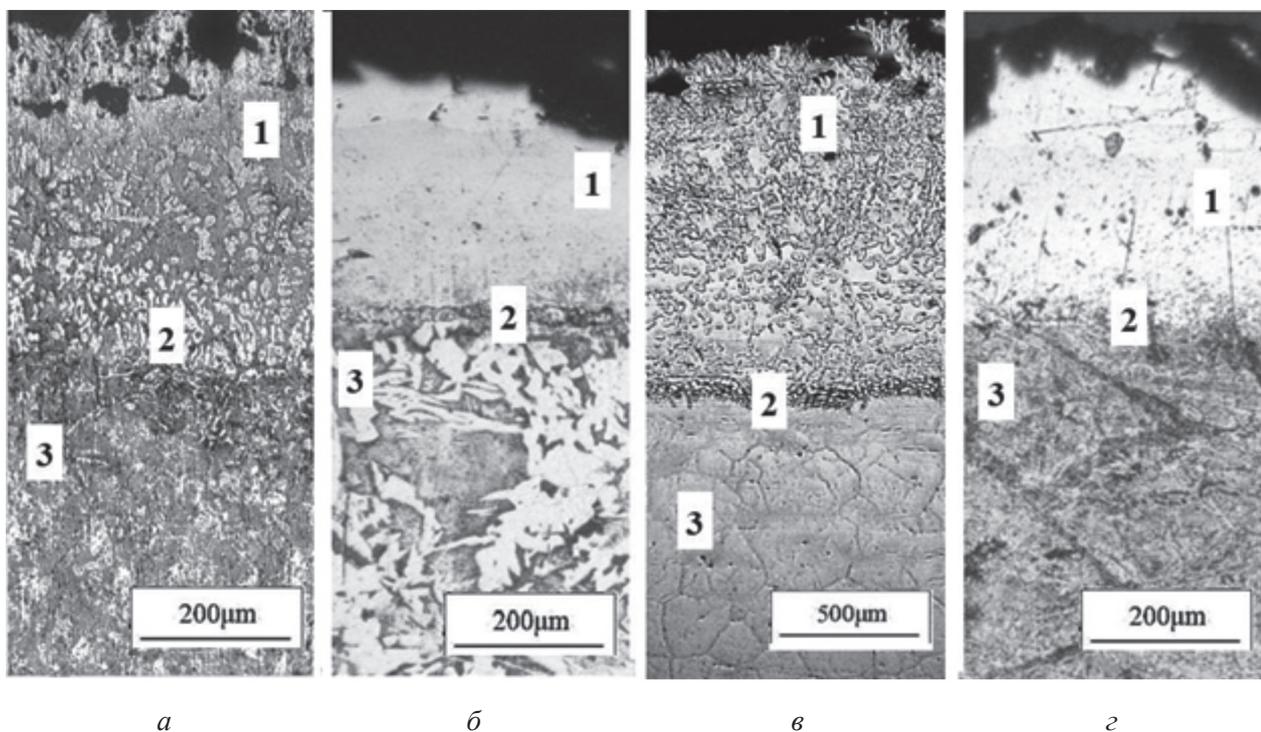


Рис. 7. Микроструктуры сталей после ХТО при температуре 1050 °С, 4 ч:

a – Ст3 без МА; *б* – Ст3 после МА; *в* – 3Х2В8Ф без МА; *г* – 3Х2В8Ф после МА (МА – механоактивация)

Fig. 7. Microstructures of steels after TCT at a temperature of 1050 °C for 4 h

a – St3 without MA; *б* – St3 after MA; *в* – 3Kh2V8F without MA; *г* – 3Kh2V8F after MA (MA – mechanical activation)

представляется более весомым. В результате реакции этих частиц с карбидом бора в процессе ХТО формируется FeB.

Для проверки активности насыщающей смеси после механоактивации и одного процесса ХТО был проведен повторный процесс при

950 °С продолжительностью 2 ч с теми же образцами стали. Распределение микротвердости показано на рис. 9.

Установлено, что смесь теряет свою насыщающую способность. Толщина слоя уменьшилась на 10...15 мкм: с 60 до 50 мкм на Ст3 и с 65 до

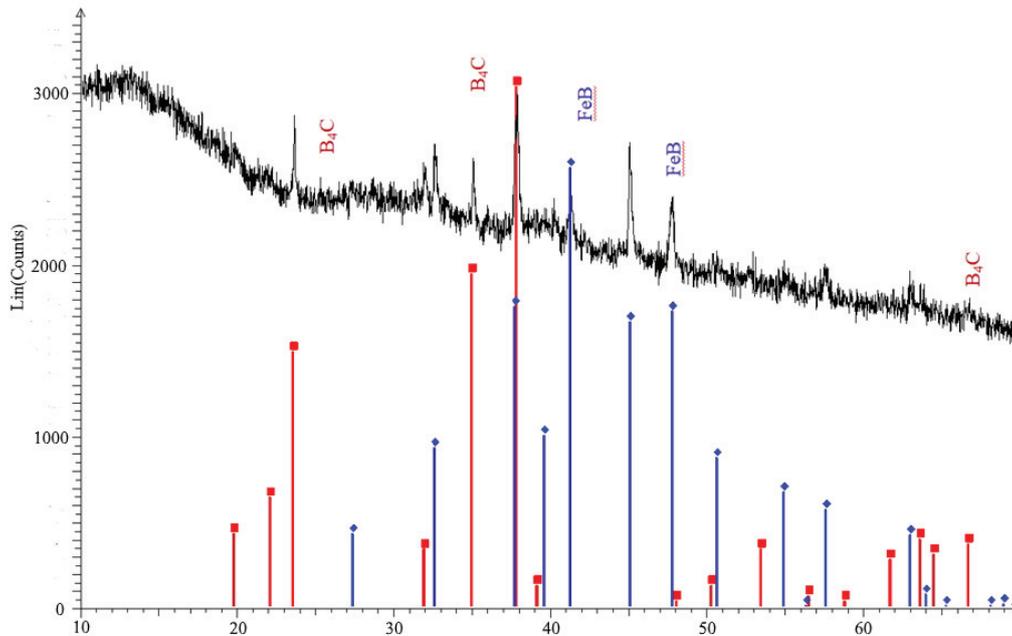


Рис. 8. Рентгенограмма смеси после 30 мин механоактивации и процесса ХТО 950 °С, 2 ч

Fig. 8. XRD-pattern of the mixture after 30-minutes of mechanical activation and TCT at a temperature of 950 °C for 2 h

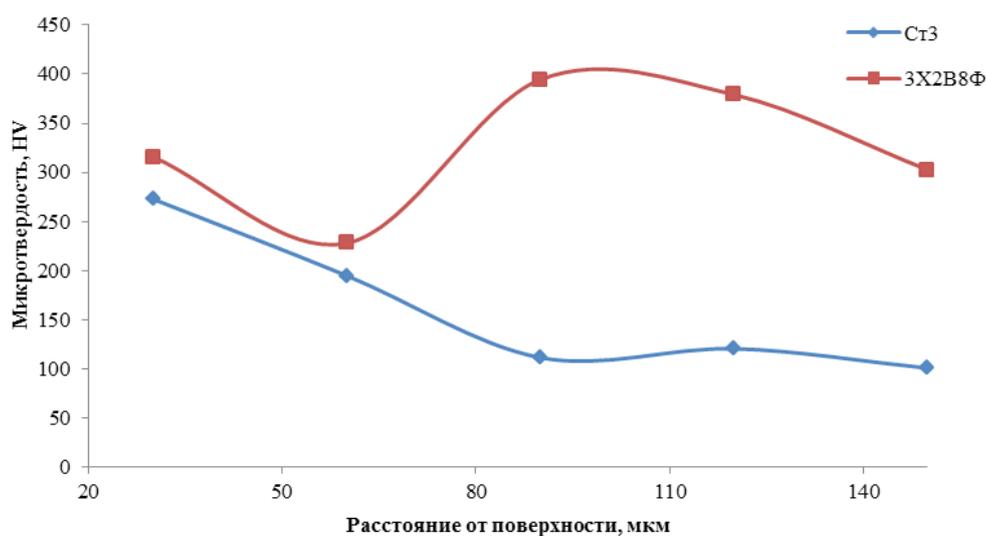


Рис. 9. Распределение микротвердости по глубине при 950 °С, 2 ч с повторным использованием насыщающей смеси

Fig. 9. The distribution of the microhardness over the layer depth at a temperature of 950 °C for 2 h with recycling of the saturating mixture

50 мкм на образце стали 3Х2В8Ф. Показатели микротвердости снизились в среднем на 50 НВ для Ст3 и незначительно снизились для стали 3Х2В8Ф. Наиболее вероятной причиной снижения твердости и уменьшения толщины слоя является образование FeВ и расход NaF, который применяется в качестве активатора. Таким образом, повторное использование насыщающей смеси возможно при необходимости получения более тонких слоев.

Выводы

На основании выполненных исследований установлена принципиальная возможность применения предварительной механоактивации насыщающих смесей при ХТО малоуглеродистых и штамповых марок сталей (на примере Ст3 и 3Х2В8Ф) с целью получения диффузионных слоев с заданными прочностными характеристиками.

Установлено, что толщина слоя на сталях после ХТО в смесях без механоактивации превосходит толщину слоя после ХТО в механоактивированных порошках в 1,4...1,7 раза при 950 °С и в 4,3...6 раз при 1050 °С.

Установлено, что увеличение продолжительности и температуры ХТО в механоактивированных смесях приводит к повышению содержания алюминия в слое по сравнению со смесями без механоактивации.

Список литературы

1. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки: учебное пособие. – М.: Новое знание, 2010. – 304 с.
2. Kulka M. Current trends in boriding: Techniques. – Cham, Switzerland: Springer, 2019. – 282 p. – (Engineering materials).
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. – N 5. – P. 64–77. – DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.
4. Thermocyclic boroaluminizing of low carbon steels in pastes / U. Mishigdorzhiiyn, I. Polyansky, I. Sizov, B. Vetter, A. Schlieter, S. Heinze, C. Leyens // Materials Performance and Characterization. – 2017. – Vol. 6, iss. 4. – P. 531–545. – DOI: 10.1520/MPC20160082.
5. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов / отв. ред. А.С. Колосов; АН СССР, Сибирское отделение, Институт химии твердого тела и переработки минерального сырья. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука, 1986. – 303 с.
6. Механокомпозиты – прекурсоры для создания материалов с новыми свойствами / А.И. Анчаров [и др.]; отв. ред. О.И. Ломовский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – 432 с.
7. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий / [Болдырев В.В. и др.]; отв. ред. Е.Г. Аввакумов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 342 с.
8. The effect of mechanical activation of metal powders on their reactivity and the properties of plasma-deposited coatings / V.A. Polyboyarov, A.E. Lapin, Z.A. Korotaeva, A. Cherepanov, O. Solonenko, N.S. Kobotaeva, E.E. Sirotkina, M. Korchagin // Physical Meso-mechanics. – 2002. – N 5. – P. 89–94.
9. Shojaie M. Mechanically activated combustion synthesis of B₄C-TiB₂ nanocomposite powder // Journal of Advanced Materials and Processing. – 2017. – Vol. 5, N 1. – P. 13–21.
10. Self-propagating high-temperature synthesis in mechanically activated mixtures of boron carbide and titanium / M.A. Korchagin, A.I. Gavrilov, V.E. Zarko, A.B. Kiskin, Yu.V. Iordan, V.I. Trushlyakov // Combustion, Explosions, and Shock Waves. – 2017. – Vol. 53. – P. 669–677. – DOI: 10.1134/S0010508217060077.
11. Gaffet E., Bernard F. Mechanically activated powder metallurgy processing: a versatile way towards nanomaterials synthesis // Annales de Chimie Science des Matériaux. – 2002. – Vol. 27, iss. 6. – P. 47–59. – DOI: 10.1016/S0151-9107(02)90014-0.
12. Torabi O., Ebrahimi-Kahrizsangi R. Effect of the aluminum content on the mechanochemical behavior in ternary system Al-B₂O₃-C // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2013. – Vol. 36. – P. 90–96. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.07.006.
13. Яковенко Р.В. Влияние механоактивации на структуру и свойства хромистой карбидостали с добавками карбида бора // Современные проблемы физического материаловедения. – Киев, 2015. – Вып. 24. – С. 94–99.
14. Каченюк М.Н., Сметкин А.А. Эволюция структуры композиционных частиц при механоактивации порошковых смесей на основе титана, карбида кремния и углерода // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.
15. An evaluation of a borided layer formed on Ti-6Al-4V alloy by means of SMAT and low-temperature boriding / Q. Yao, J. Sun, Y. Fu, W. Tong, H. Zhang // Materials. – 2016. – Vol. 9, N 12. – P. 993. – DOI: 10.3390/ma9120993.

16. Synthesis of Al-B₄C composite coating on low carbon steel by mechanical alloying method / A. Canakci, F. Erdemir, T. Varol, S. Özkaya, R. Dalmış // Usak University Journal of Material Sciences. – 2014. – Vol. 1. – P. 15–22.

17. Wear resistance of HVOF sprayed coatings from mechanically activated thermally synthesized Cr₃C₂-Ni spray powder / H. Sarjas, K. Priit, K. Juhani, M. Viljus, V. Matikainen, P. Vuoristo // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 65, N 2. – P. 101–106. – DOI: 10.3176/proc.2016.2.10.

18. Production of thermal spray Cr₃C₂-Ni powders by mechanically activated synthesis / D. Tkachivskiy, K. Juhani, A. Surzhenkov, P. Kulu, M. Viljus, R. Traksmaa, V. Jankauskas, R. Leišys // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 799. – P. 31–36. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.31.

19. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhijn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // Lubricants. – 2020. – Vol. 8, iss. 3. – DOI: 10.3390/lubricants8030026.

20. *Mishigdorzhijn U., Sizov I.* The influence of boroaluminizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels // Materials Performance and Characterization. – 2018. – Vol. 7, N 3. – P. 252–265. – DOI: 10.1520/MPC20170074.

21. *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.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Effect of Mechanical Activation of the Powder Mixture on the Structure and Properties of Boro-Aluminized Low-Carbon Steels

Pavel Gulyashinov^{1, a, *}, Undrakh Mishigdorzhiiyn^{2, b, c}, Nikolay Ulakhanov^{3, c}

¹Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanovoy st., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

²Institute of Physical Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanovoy st., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

³East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya st., 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: 03 September 2020

Revised: 11 September 2020

Accepted: 29 October 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Thermal-chemical treatment (TCT)

Mechanical activation

Boro-aluminizing

Boron carbide

Aluminum

Carbon steel

Alloy steel

Funding

The research is supported by grant of the Russian Science Foundation (project №19-79-10163).

ABSTRACT

Introduction. Boro-aluminizing is one of the most effective ways to improve the performance properties (corrosion resistance, heat and wear resistance) of low-carbon steels. Solid-phase methods of thermochemical treatment (TCT) are carried out from saturating mixtures based on powder materials. Preliminary mechanical activation of these powders is one of the ways to improve the properties of the resulting diffusion layer. **The purpose of this work** is to determine the effect of preliminary mechanical activation of the powder mixture on the structure and properties of the boro-aluminized layer on the surface of low-carbon steels. **Methods:** The paper considers the results of research on the preliminary mechanical activation of the saturating mixture in the TCT of low-carbon steels (for example, St3 and 3Kh2V8F) based on powdered boron and aluminum carbide. The results of experiments on preliminary mechanical activation of the saturating mixture are shown, and the dependence of the particle size of the initial mixture on the duration of mechanical activation is established. Samples of steels with a diffusion layer after TCT are obtained. It is found that the process temperature has a significant effect on the thickness of the layers obtained. With an increase in temperature from 950 °C to 1050 °C on St3 steel samples, the layer thickness increases from 120 to 150 μm, on 3Kh2V8F steel samples – 105 and 140 μm with a holding time of 2 h and 4 h, respectively. The microstructure of the obtained samples is investigated; dependence diagrams of the microhardness distribution on the depth of diffusion layers are shown. The distribution of Al over the depth of the resulting boro-aluminized layer is established. As additional studies, the saturation capacity of the mixture after a single application in the TCT process is studied. **Results and discussions.** The principal possibility of using mechanical activation in TCT to obtain diffusion layers with specified strength characteristics is established. An increase in the duration and temperature of TCT in mechanically activated mixtures leads to an increase in the aluminum content in the layer.

For citation: Gulyashinov P.A., Mishigdorzhiiyn U.L., Ulakhanov N.S. Effect of mechanical activation of the powder mixture on the structure and properties of boro-aluminized low-carbon steels. *Obrabotka metallov (tehnologiya, 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. (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.
2. Kulka M. *Current trends in boriding: Techniques*. Cham, Switzerland, Springer, 2019. 282 p.
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, no. 5, pp. 64–77. DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.

* Corresponding author

Gulyashinov Pavel A., Ph.D. (Engineering), Research associate
 Baikal Institute of Nature Management
 Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
 6 Sakhyanovoy str.,
 670047, Ulan-Ude, Russian Federation
 Tel.: +7 (3012) 43-36-76, e-mail: gulpasha@mail.ru

4. Mishigdorzhyn U., Polyansky I., Sizov I., Vetter B., Schlieter A., Heinze S., Leyens C. Thermocyclic boroaluminizing of low carbon steels in pastes. *Materials Performance and Characterization*, 2017, vol. 6, iss. 4, pp. 531–545. DOI: 10.1520/MPC20160082.
5. Avvakumov E.G. *Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods of activation of chemical processes]. 2nd ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 303 p.
6. Lomovskii O.I., ed. *Mekhanokompozity – prekursory dlya sozdaniya materialov s novymi svoistvami* [Mechanocomposites – precursors for creation of materials with new properties]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2010. 432 p.
7. Avvakumov E.G., ed. *Fundamental'nye osnovy mekhanicheskoi aktivatsii, mekhanosinteza i mekhanokhimi-cheskikh tekhnologii* [Fundamental bases of mechanical activation, mechanosynthesis and mechanochemical technologies]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2009. 342 p.
8. Polyboyarov V.A., Lapin A.E., Korotaeva Z.A., Cherepanov A.N., Solonenko O.P., Kobotaeva N.S., Sirotkina E.E., Korchagin M.A. The effect of mechanical activation of metal powders on their reactivity and the properties of plasma-deposited coatings. *Physical Mesomechanics*, 2002, no. 5, pp. 89–94.
9. Shojaie M. Mechanically activated combustion synthesis of B₄C-TiB₂ nanocomposite powder. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 13–21.
10. Korchagin M.A., Gavrilo A.I., Zarko V.E., Kiskin A.B., Iordan Yu.V., Trushlyakov V.I. Self-propagating high-temperature synthesis in mechanically activated mixtures of boron carbide and titanium. *Combustion, Explosions, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, pp. 669–677. DOI: 10.1134/S0010508217060077.
11. Gaffet E., Bernard F. Mechanically activated powder metallurgy processing: a versatile way towards nanomaterials synthesis. *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 2002, vol. 27, iss. 6, pp. 47–59. DOI: 10.1016/S0151-9107(02)90014-0.
12. Torabi O., Ebrahimi-Kahrizsangi R. Effect of the aluminum content on the mechanochemical behavior in ternary system Al-B₂O₃-C. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, vol. 36, pp. 90–96. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.07.006.
13. Yakovenko R.V. Vliyanie mekhanoaktivatsii na strukturu i svoistva khromistoi karbidostali s dobavkami karbida bora [Effect of mechanical activation on the structure and properties of Cr₃C₂ reinforced steels with the addition of boron carbide]. *Sovremennye problemy fizicheskogo materialovedeniya* [Modern problems of physical materials science]. Kiev, 2015, iss. 24, pp. 94–99.
14. Kachenyuk M.N., Smetkin A.A. Evolyutsiya struktury kompozitsionnykh chastits pri mekhanoaktivatsii poroshkovykh smesei na osnove titana, karbida kremniya i ugleroda [Structure evolution of the composite particles at mechanical activation powder titanium, silicon carbide and carbon mixture]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2014, no. 6.
15. Yao Q., Sun J., Fu Y., Tong W., Zhang H. An evaluation of a borided layer formed on Ti-6Al-4V alloy by means of SMAT and low-temperature boriding. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 12, p. 993. DOI: 10.3390/ma9120993.
16. Canakci A., Erdemir F., Varol T., Özkaya S., Dalmış R. Syntesis of Al-B₄C composite coating on low carbon steel by mechanical alloying method. *Usak University Journal of Material Sciences*, 2014, vol. 1, pp. 15–22.
17. Sarjas H., Priit K., Juhani K., Viljus M., Matikainen V., Vuoristo P. Wear resistance of HVOF sprayed coatings from mechanically activated thermally synthesized Cr₃C₂-Ni spray powder. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 101–106. DOI: 10.3176/proc.2016.2.10.
18. Tkachivskiy D., Juhani K., Surzhenkov A., Kulu P., Viljus M., Traksmaa R., Jankauskas V., Leišys R. Production of thermal spray Cr₃C₂-Ni powders by mechanically activated synthesis. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 799, pp. 31–36. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.31.
19. Mishigdorzhyn 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. DOI: 10.3390/lubricants8030026.
20. Mishigdorzhyn U., Sizov I. The influence of boroaluminizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels. *Materials Performance and Characterization*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 252–265. DOI: 10.1520/MPC20170074.
21. 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.

© 2020 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 (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- 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 информативный 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 повторов, 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, степень 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, 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 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.

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 ВИНТИ 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 незначущих 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 изменчивости 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 ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -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 ^{31}P MR, 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.

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства (<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

На сайте издательства также приведены примеры рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5rtkb73ae013ofk4g8nrv1>.

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 $V_4C-Ni-P$

(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,

$V_4C-Ni-P$,

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 $V_4C-Ni-P$ // 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/м³ (17.5 mol/m³); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с², 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 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, так и скобок: J/(mol·K) или $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$, 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 ($T_{\text{пл}}$ – 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; 1.3.14a; рис. 1, a).

В географических координатах широты отделяются пробелами: 56,5 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °E.

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 B₄C-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 указывается 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 spraying

Boron carbide

B₄C-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 B₄C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka metallov (tehnologiya, 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.)

¹Корниенко Елена Евгеньевна, ²Кузьмин Виктор Иванович, ³Сивков Александр Анатольевич

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

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

³Томский 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 В₄С-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, В₄С-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 В₄С / Н. Zhu, Y. Niu, С. Lin, L. Huang, Н. 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 B₄C-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 spraying, Boron carbide, B₄C-Ni-P, Coating

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



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 № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 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 %

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 ВИНТИ;

- 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

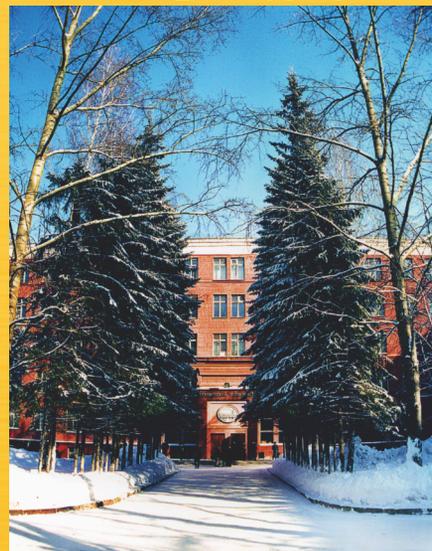
Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 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



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/>