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

Том 22, Номер 1 ЯНВАРЬ – МАРТ 2020

ОМ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

Поздравляем с Юбилеем!

Кафедре металлорежущие станки и инструменты КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева 13 марта 2020 года исполняется 40 лет!

За годы существования кафедра МСиИ подготовила более 1800 инженеров, бакалавров и магистров для промышленности Кузбасса, 14 кандидатов и докторов технических наук. На кафедре ведется обучение по 124 специальным дисциплинам, имеется филиал кафедры на оборонном предприятии АО «Кемеровский механический завод», девять специализированных лабораторий, парк металлорежущих станков из 29 наименований, металлографическое оборудование (микроскопы, твердомеры, закалочные печи).

Действующие направления обучения на кафедре:

- 27.02.07 (СПО),
- 15.03.05, 27.03.02 (бакалавры),
- 15.04.05, 27.04.02 (магистры),
- 15.05.01 (специалитет),
- 05.02.07 (аспирантура).

В течение 30 лет кафедрой руководит А.Н. Коротков, д-р техн. наук, профессор, действительный член академий РАЕ, МАН ВШ, АПК, заслуженный работник высшей школы РФ, эксперт Общественной палаты, Фонда развития промышленности Кемеровской области, Научно-образовательного центра (НОЦ «Кузбасс»).

История не стоит на месте, и кафедра продолжит свою созидательную деятельность на благо Кузбасса и Российской Федерации в целом!

Редакция журнала «Обработка металлов»

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Том 22 № 1 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: **Чувилин А.Л.**, кандидат физико-математических наук, профессор, научный руководитель группы электронной микроскопии «CIC nanoGUNE», г. Сан-Себастьян

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

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

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

Иванцивский Владимир Владимирович – доцент, доктор технических наук.

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

Журнал зарегистрирован 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_metallov

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

Цена свободная

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Скиба В.Ю. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей..... 6

Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Комплексный анализ процесса электроэрозионной обработки биметаллического материала сталь-медь..... 16

Ингеманссон А.Р. Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах..... 27

Зубков Н.Н. Растяжные титановые сетки на основе деформирующего резания..... 41

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Бобылёв Э.Э., Клокова Н.Л. Влияние нанесения диффузионных титановых покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на механические свойства режущего твердосплавного инструмента..... 54

Лапшин В.П. Влияние скорости резания металлов на регенерацию вибрационных колебаний инструмента в станках токарной группы..... 65

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Корниенко Е.Е., Вялова А.Д. Шикалов В.С., Косарев В.Ф., Видюк Т.М. Интерметаллидные покрытия Al_3Ti, сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки..... 80

Алфёрова Е.А., Филиппов А.В. Влияние структуры материала на морфологию деформированной поверхности..... 90

Шамарин Н.Н., Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Подгорных О.А., Утяганова В.Р. Влияние структурного состояния коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество поверхности после точения.... 102

Гусарова А.В., Чумаевский А.В., Осипович К.С., Калашникова Т.А., Калашников К.Н. Закономерности структурообразования в материалах, полученных гибридным аддитивно-термомеханическим методом..... 114

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Рекомендации по написанию научной статьи 136

Подготовка аннотации 139

Правила для авторов 141

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

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

Подписано в печать 03.03.2020. Выход в свет 13.03.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 18,5. Уч.-изд. л. 34,41. Изд. № 25. Заказ 437. Тираж 300 экз.

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

OBRABOTKA METALLOV
METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

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

Volume 22 No.1 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 "VNIIINSTRUMENT", *Moscow*;

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

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

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

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

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

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

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

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher,
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

Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeeba V.Yu. Investigation of the Process of Automatic Control of Current Polarity Reversal in the Conditions of Hybrid Technology of Electrochemical Processing of Corrosion-Resistant Steels..... 6

Shlykov E.S., Ablyaz T.R. Complex Analysis of the Process of Electrical Discharge Machining of Bimetallic Steel-Copper Material..... 16

Ingemansson A.R. Development of Mathematical Models for Technological Preparation of Production and Adaptive Control for Turning and Milling in Digital Production Systems..... 27

Zubkov N.N. Expanded Titanium Meshes Based on Deformational Cutting..... 41

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Bobylyov E.E., Klokova N.L. Influence of Diffusion Saturation from Liquid Metal media Solutions to Mechanical Properties of Hard Alloy Cutting Tool..... 54

Lapshin V.P. The Influence of the Cutting Speed of Metals on the Regeneration of the Vibratory Oscillations of the Tool in Machines of the Turning Group..... 65

MATERIAL SCIENCE

Kornienko E.E., Vyalova A.D., Shikalov V.S., Kosarev V.F., Vidyuk T.M. Al_3Ti Intermetallic Coatings obtained with Help Gas Dynamic Cold Spray and Heat Treatment..... 80

Alfyorova E.A., Filippov A.V. Influence of the Material Structure on the Deformed Surface Morphology..... 90

Shamarin N.N., Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A. Utyaganova V.R. The Effect of the Structural State of AISI 321 Stainless Steel on Surface Quality During Turning..... 102

Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Kalashnikova T.A., Kalashnikov K.N. Patterns of Structure Formation in Materials obtained by Hybrid Additive-Thermomechanical Method..... 114

EDITORIAL MATERIALS

Guidelines for Writing a Scientific Paper 136

Abstract requirements 139

Rules for authors 141

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2020 Том 22 № 1 с. 6–15
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей

Михаил Борисов [1, a], ***Дмитрий Лобанов*** [1, b, *], ***Александр Янюшкин*** [1, c], ***Вадим Скиба*** [2, d]

[1] Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр-т Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия
[2] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-9084-1820, borisovmgou@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0003-1969-7840, yanyushkinas@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047

История статьи:
Поступила: 25 ноября 2019
Рецензирование: 21 декабря 2019
Принята к печати: 20 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Электрохимическое шлифование
Программируемое устройство
Гибридная технология
Автоматическое управление
Коррозионно-стойкая сталь

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. В различных отраслях промышленности все более широкое использование находят термообработанные конструкционные материалы с повышенными физико-механическими свойствами. К таким материалам относятся коррозионно-стойкие стали. Они применяются в машиностроении для изготовления деталей и узлов машин и механизмов, в нефтехимической и газоперерабатывающей отрасли, в производстве и переработке пищевых продуктов, в фармацевтике для изготовления медицинского инвентаря и оборудования и в медицине для изготовления протезов. В современном производстве наряду с традиционными методами интенсификации технологических операций применяют комбинированные и гибридные технологии обработки. Для обработки сложнопрофильных изделий возможно применение гибридной технологии электрохимической обработки, при которой периодическая электрохимическая правка алмазного круга осуществляется путем смены полярности тока, протекающего по цепи, непосредственно в процессе шлифования без применения дополнительной цепи правки инструмента. Одной из проблем, сдерживающих широкое практическое применение гибридных технологий в промышленности, является создание необходимого оборудования, сочетающего в себе основной вид механической обработки с дополнительными источниками энергии, способное работать в автоматическом режиме. Это ведет к необходимости создания специальных систем управления для организации гибридных и комбинированных технологий в условиях автоматизированного производства. **Цель работы** – повышение эффективности гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей за счет автоматического управления сменой полярности тока. **Результаты и обсуждение.** Для выполнения поставленной задачи нами разработано и изготовлено программируемое устройство для автоматического управления сменой полярности тока в электрической цепи. Оно может реализовывать поочередно два режима работы. Первый режим – электрохимическое шлифование детали. Второй режим – электрохимическая правка алмазного круга. Исследование процесса электрохимического шлифования образцов из стали 12Х18Н10Т и электрохимической правки алмазного инструмента с использованием устройства для автоматического управления сменой полярности тока проводилось на изготовленном нами стенде. Для оценки параметров качества обработанной поверхности проводились измерения микротвердости обработанных образцов на микротвердомере HMV-G21S, исследования микрорельефа образцов, полученного на сканирующем зондовом микроскопе ACM Solver Next, и измерение величины шероховатости обработанной поверхности на профилометре модели 130. Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что применение программируемого устройства позволяет автоматизировать процесс управления сменой полярности электрического тока без снижения показателей качества шлифования поверхности в условиях гибридной технологии электрохимической обработки.

Для цитирования: Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.

Введение

В различных отраслях промышленности все более широкое применение находят конструкционные материалы с повышенными физико-механическими свойствами [1–3]. К таким

***Адрес для переписки**
Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент
Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова
пр. Московский, 15,
428015, г. Чебоксары, Россия
Тел.: +7-908-303-47-45, **e-mail:** lobanovdv@list.ru

материалам относят в том числе и высокопрочные термообработанные коррозионно-стойкие стали. Они применяются в машиностроении для изготовления деталей и узлов машин и механизмов, в нефтехимической и газоперерабатывающей отрасли, в производстве и переработке пищевых продуктов, в фармацевтике для изготовления медицинского инвентаря и оборудования, а также в медицине для изготовления протезов [4]. Требования к качественным и эксплуатационным характеристикам готовых изделий из труднообрабатываемых материалов наряду с повышением производительности их обработки традиционными методами выполнить сложно [5–9]. Достигнуть эффективности обработки возможно за счет изменения механизма контактных процессов, протекающих в зоне резания [10, 11].

Подобное воздействие достигается комбинированием механического резания с химической, электрической, электромагнитной или тепловой энергией. Дополнительная энергия от сопутствующих резанию процессов в этом случае может быть совмещена с действием основного процесса механической обработки, что синтезирует новые гибридные или комбинированные технологии [12–14].

Одним из методов финишной обработки термообработанных деталей является абразивная обработка – шлифование. Существенно повысить качество абразивной обработки удалось введением в зону контакта обрабатываемой поверхности и поверхности абразивного инструмента дополнительной энергии – постоянного электрического тока и электролита. Для этого создают электрическую цепь, в которую входят источник тока, обрабатываемая деталь и инструмент. Обработка основана на одновременном использовании анодного растворения материала детали и механическом удалении продуктов распада [15–18].

Преимуществами электрохимического шлифования по сравнению с традиционными способами шлифования являются: улучшение качества поверхностей изделий, резкое повышение производительности шлифования труднообрабатываемых материалов, в том числе коррозионно-стойких сталей [19, 20].

Для реализации этого способа необходимо наличие электропроводного абразивного инструмента, например, алмазных кругов на металлической связке. Вместе с тем в процессе обработки рабочая поверхность алмазного круга с течением времени теряет режущую способность вследствие затупления абразивных зерен и заполнения пространства между зернами продуктами износа, называемого процессом «засаливания». Это явление приводит к ухудшению режущих способностей инструмента и снижению качества поверхности детали [21–27].

Правку алмазного круга проводят электрохимическим способом с остановкой процесса шлифования и подачей тока обратной полярности в дополнительно создаваемую электрическую цепь, в которую входят источник тока, алмазный круг и правящий катод. При этом алмазный круг является анодом, что приводит к растворению засаленного слоя и связки, а также восстановлению его режущей способности. Но частая остановка процесса обработки для осуществления правки инструмента снижает эффективность его применения.

Повысить эффективность процесса обработки позволило решение осуществления непрерывной электрохимической правки поверхности круга непосредственно в процессе электрохимического шлифования. При этом используются две электрические цепи одновременно. В одну цепь входят источник тока, обрабатываемая деталь и инструмент, а во вторую – источник тока, алмазный круг и правящий катод. Такой метод нельзя применить при обработке пазов, отверстий, а также при обработке деталей со сложным переменным профилем, так как отсутствует пространство для размещения правящего катода вблизи инструмента [28].

Для сложнопрофильных изделий возможно применение гибридной технологии электрохимической обработки, при которой периодическая электрохимическая правка алмазного круга осуществляется путем смены полярности тока, протекающего по цепи, непосредственно в процессе шлифования без применения дополнительной цепи правки инструмента. Для управления направлением прохождения электрического тока по цепи и его длительностью используется блок управления с ручным переключением полярности тока [28].

Широкое практическое применение гибридных и комбинированных технологий, на наш взгляд, сдерживается необходимостью исполь-

зования для их реализации специализированного или конструирования специального оборудования, сочетающего в себе необходимые виды воздействия в совокупности с возможностью управления процессами в автоматическом режиме. Это ведет к необходимости создания систем автоматического управления гибридными и комбинированными технологиями для обеспечения заданных качественных и эксплуатационных параметров [29].

Цель работы – повышение эффективности гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей за счет автоматического управления сменой полярности тока.

Методика исследований

Для выполнения поставленной цели нами было разработано и изготовлено программируемое устройство для автоматического управления сменой полярности тока в электрической цепи. Оно может реализовывать поочередно два режима работы. Первый режим – электрохимическое шлифование детали; второй режим – электрохимическая правка алмазного круга. Принцип работы устройства в указанных режимах показан на рис. 1 и 2.

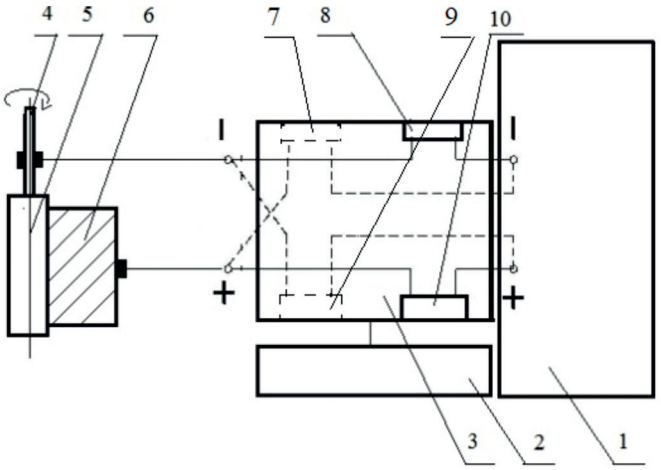


Рис. 1. Схема работы устройства в режиме электрохимического шлифования детали:

1 – источник тока; *2* – блок управления; *3* – блок коммутации токов; *4* – инструментальный шпиндель; *5* – алмазный круг; *6* – обрабатываемая деталь; *7,8,9,10* – реле

Fig. 1. The scheme of the device in the electrochemical grinding of the part:

1 – current source; *2* – control unit; *3* – current switching unit; *4* – tool spindle; *5* – diamond wheel; *6* – work piece; *7, 8, 9, 10* – relay

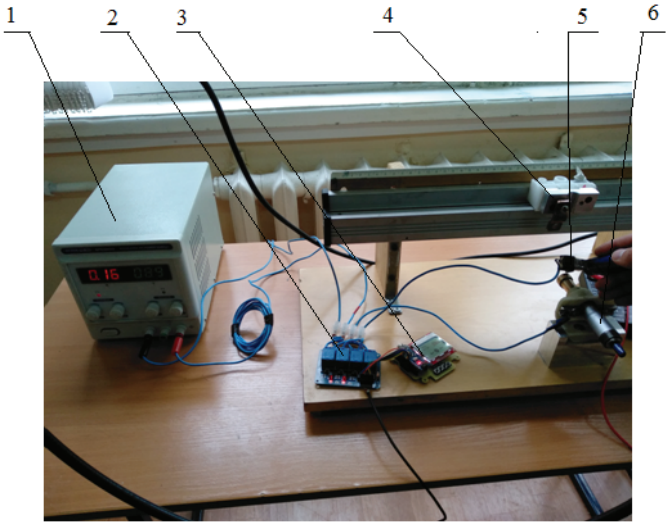


Рис. 2. Исследовательский стенд:

1 – источник тока; *2* – блок коммутации токов; *3* – блок управления; *4* – привод линейного перемещения; *5* – инструментальный наконечник гравера; *6* – приспособление для закрепления детали

Fig.2. Research bench:

1 – current source; *2* – current switching unit; *3* – control unit; *4* – linear displacement drive; *5* – tool tip engraver; *6* – fixture for fixing parts

На рис. 1 представлена схема работы устройства в режиме электрохимического шлифования детали (электролит условно не показан).

Управляющий сигнал поступает с блока управления *2* на реле *8* и *10*, установленные в блоке коммутации токов *3*. Силовые цепи реле замыкаются. В результате этого обрабатываемая деталь *6* соединяется с положительным полюсом источника тока *1*, а алмазный круг *5* соединяется с отрицательным полюсом источника тока *1*. Происходит процесс анодного растворения материала на поверхности обрабатываемой детали *6*, который удаляется алмазным кругом *5*.

В режиме электрохимической правки алмазного круга управляющий сигнал поступает с блока управления *2* на реле *8* и *10*, размыкает их силовые цепи и на реле *7* и *9* замыкает их силовые цепи. В результате этого обрабатываемая деталь *6* соединяется с отрицательным полюсом источника тока *1*, а алмазный круг *5* соединяется с положительным полюсом источника тока *1*. Происходит процесс анодного растворения засаленного слоя и материала связки алмазного круга *5*.

Исследование процесса электрохимического шлифования и электрохимической правки инструмента с использованием устройства для

автоматического управления сменой полярности тока проводилось на изготовленном нами стенде (рис. 2).

Исследовательский стенд состоит из источника тока *1*, устройства для автоматического управления сменой полярности тока, имеющего блок коммутации токов *2* и блок управления *3*, привода линейного перемещения *4*, инструментального наконечника гравера *5* и приспособления для закрепления детали *6*. Наконечник гравера *5* при проведении исследований устанавливался в привод линейного перемещения *4*. Приспособление для закрепления детали *6* снабжено микрометрическим винтом для настройки глубины резания. Деталь, инструмент и источник тока соединены в одну электрическую цепь, изолированную от других элементов стенда.

Исследования проводились путем электрохимического шлифования образцов из стали 12Х18Н10Т диаметром 10 мм и высотой 6 мм с использованием программируемого устройства для автоматического управления сменой полярности тока. Режимы обработки – скорость резания 5,5 м · $с^{-1}$, глубина резания 0,1 мм, продольная подача 50 мм/мин – соответствовали режимам резания, устанавливаемым при исследовании гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т [28]. В качестве инструмента применялась цилиндрическая алмазная головка на металлической связке диаметром 3 мм. Размер зерна 90…125 мкм.

Обработка осуществлялась с применением электролита на водной основе ($NaNO_3$ – 3 %, $NaNO_2$ – 1 %, Na_2CO_3 – 0,5 %). Напряжение в цепи «источник тока – инструмент – образец» без нагрузки составляло 11…12 В; величина тока во время обработки составила 0,1…0,18 А; плотность тока – 1…1,8 А/$см^2$; продолжительность импульса рабочего тока – 2 с; продолжительность импульса тока правки – 0,5 с. Указанные режимы смены полярности приняты с учетом обеспечения максимальной интенсивности съема материала [30].

Циклы импульсов тока воспроизводились посредством программируемого устройства. На рис. 3 представлен дисплей программируемого устройства и его главное меню.

Главное меню включает следующие пункты:

– выбор программы;

Рис. 3. Дисплей программируемого устройства и его главное меню

Fig. 3. The display of the programmable device and its main menu

– параметры программы;

– настройки.

С целью контроля корректности отработки управляющих программ для последовательного воспроизведения циклов обработки детали и правки инструмента использовался цифровой тестер-мультиметр и часы реального времени, встроенные в программируемое устройство.

Для оценки параметров качества обработанной поверхности проводились измерения микротвердости обработанных образцов на микротвердомере HMV-G21S, исследования микрорельефа образцов, полученного на сканирующем зондовом микроскопе ACM Solver Next и измерение величины шероховатости обработанной поверхности на профилометре модели 130.

Исходная микротвердость образцов составляла 420…450 HV. Значение шероховатости *Ra* = 0,408 мкм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены показания цифрового тестера мультиметра при нахождении программируемого устройства в режиме электрохимического шлифования образца и показания времени выполнения процесса на дисплее программируемого устройства. На дисплее тестера отображается напряжение, равное 11,19 В, а на дисплее программируемого устройства отображается время, равное 2 с. Указанные значения соответствуют значениям, заданным в программе функционирования устройства.

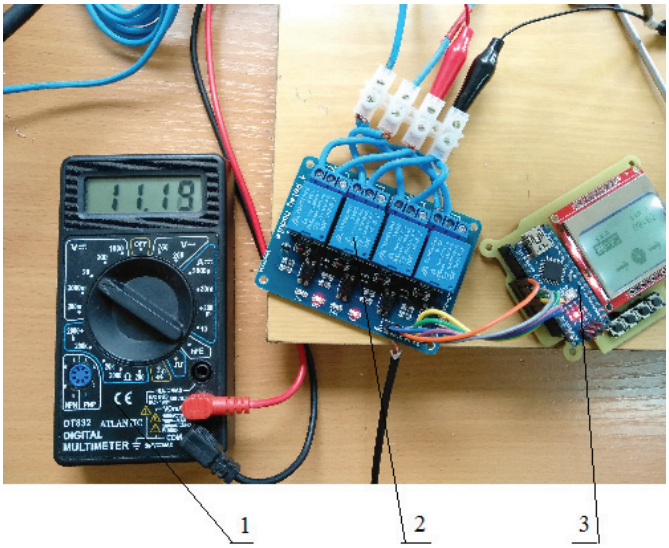


Рис. 4. Показания цифрового тестера мультиметра при нахождении программируемого устройства в режиме электрохимического шлифования детали:
1 – цифровой тестер мультиметр; *2* – блок коммутации токов; *3* – блок управления реле с дисплеем

Fig.4. Indications of a digital multimeter tester when a programmable device is in electrochemical grinding of a part:
1 – digital multimeter tester; *2* – current switching unit; *3* – relay control unit with display

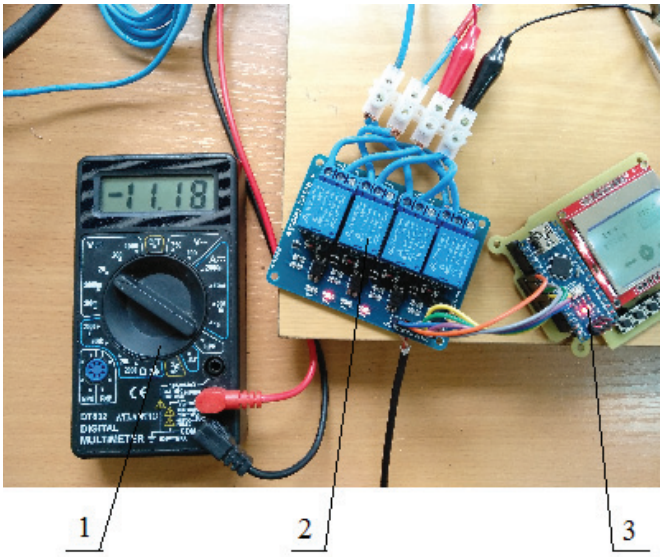


Рис. 5. Показания цифрового тестера мультиметра при нахождении программируемого устройства в режиме электрохимической правки алмазного круга:
1 – цифровой тестер мультиметр; *2* – блок коммутации токов; *3* – блок управления реле с дисплеем

Fig.5. Indications of a digital multimeter tester when a programmable device is in the diamond wheel electrochemical dressing mode:
1 – digital multimeter tester; *2* – current switching unit; *3* – relay control unit with display

На рис. 5 представлена фотография цифрового тестера мультиметра при нахождении программируемого устройства в режиме электрохимической правки алмазного круга. На дисплее тестера отображается напряжение, равное –11,18 В, а на дисплее программируемого устройства отображается время, равное 0,5 с. Указанные значения соответствуют значениям, заданным в программе функционирования устройства.

Микротвердость образцов после электрохимического шлифования с периодической электрохимической правкой инструмента составила 420…450 HV, что соответствует исходной микротвердости образцов.

На рис. 6 представлен микрорельеф участка поверхности образца. Он характеризуется плавным контуром неровностей, величина которых находится в пределах от 2 до 4 нм, что свидетельствует о стабильности процесса электрохимической обработки.

Измеренное значение шероховатости Ra = = 0,315 мкм. Это значение на 30 % меньше, чем исходная шероховатость образцов.

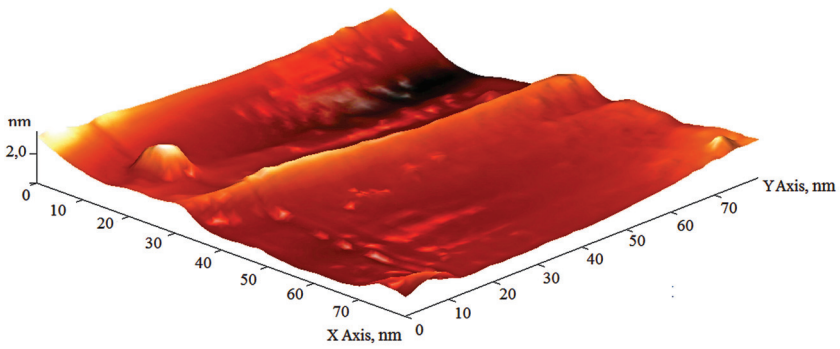


Рис. 6. Микрорельеф поверхности образца

Fig. 6. Microrelief of the sample surface

Выводы

Анализ результатов исследования процесса электрохимического шлифования образцов, изготовленных из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, и электрохимической правки алмазных головок на металлической связке с использованием программируемого устройства для автоматического управления сменой полярности тока в электрической цепи, образованной источником тока, обрабатываемым образцом и алмаз-

ной головкой, позволяет сделать вывод: применение программируемого устройства позволяет автоматизировать процесс управления сменой полярности электрического тока, что повышает эффективность гибридной технологии электрохимической обработки.

Список литературы

1. *Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П., Илларионов И.Е.* Расчет заготовки поршня из объемного наноструктурного материала на основе меди для машин литья под давлением // Теория и технология металлургического производства. – 2019. – № 2. – С. 29–36.

2. *Шалунов Е.П., Смирнов В.М., Урянский И.П.* Износостойкие подшипники скольжения из наноструктурных материалов для мощных электродвигателей // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 131–139.

3. *Солер Я.И., Гайсин С.Н., Казимиров Д.Ю.* Прогнозирование микрорельефа шлифованных деталей переменной жесткости из стали 13Х15Н4АМ3 при многопроходном съеме припуска // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. – № 1 (25). – С. 64–70.

4. *Grigorenko V.B.* Applications of corrosion-resistant steel // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44, iss. 1. – P. 80–85. – DOI: 10.3103/S0967091214010070.

5. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолокнистых композиционных материалов на полимерной основе / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.В. Базаркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 150–153.

6. *Аврелькин В.А., Купцов М.В.* Использование усовершенствованных технологий, разработанных учеными Поволжья, на машиностроительных предприятиях Чувашской республики // Инновационные технологии в металлообработке: Всероссийская научно-практическая заочная конференция с международным участием, г. Ульяновск, 25 ноября 2018 г.: сборник научных трудов. – Ульяновск, 2019. – С. 158–163.

7. Axial tool for the machining of composites / E.V. Vasil'ev, A.Y. Popov, I.A. Bugai, P.V. Nazarov // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – P. 771–772. – DOI: 10.3103/S1068798X1510024X.

8. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 67–78.

9. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Т. 5 / А.С. Верещагина, А.П. Возняковский, Т.Ф. Григорьева, О.Н. Кириллов, А.М. Козлов, А.А. Козлов, В.А. Лиопо, А.В. Мандрыкин, Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, Е.В. Овчинников, В.А. Панайоти, Д.И. Петрешин, С.А. Попов, Д.А. Прушак, А.Ю. Рязанцев, О.В. Скрыгин, В.П. Смоленцев, В.А. Струк, С.Ю. Съянов, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко, Е.И. Эйсымонт: коллективная монография. – М.: Спектр, 2015. – 464 с. – ISBN 978-5-4442-0088-9.

10. *Чесов Ю.С., Иванцивский В.В., Птицын С.В.* Технология, оборудование и инструмент для финишных операций // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2001. – № 1 (12). – С. 52–54.

11. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing" / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 125, iss. 1. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

12. *Скиба В.Ю.*, *Иванцивский В.В.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.

13. Deep grinding of incomplete-cycle surfaces, with periodic straightening of the wheel / V.A. Nosenko, V.K. Zhukov, A.A. Vasil'ev, S.V. Nosenko // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28. – P. 442–449. – DOI: 10.3103/S1068798X08050109.

14. *Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A.* Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01002. – DOI: 10.1051/matecconf/201712901002.

15. *Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D.* Probabilistic approach for modeling electroerosion removal of grinding wheel bond // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1426–1431. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.656.

16. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования / С.М. Братан, В.Б. Богуцкий, Ю.К. Новоселов, С.И. Рощупкин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 5 (71). – С. 9–18.

17. *Nosenko V.A., Nosenko S.V.* Deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30. – P. 1124–1128. – DOI: 10.3103/S1068798X10110110.

18. Формирование поверхностных пленок при шлифовании твердых сплавов кругами на токопроводящих связках / Л.С. Секлетина, О.И. Медведева, В.А. Гартфельдер, А.Р. Янюшкин // Наука и техника Казахстана. – 2018. – № 3. – С. 96–106.

19. Влияние СОЖ на момент трения при обработке резанием стали У8 / А.А. Ражковский, А.Г. Кисель, А.А. Фёдоров, Д.С. Реченко // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 111–114.

20. *Kozlov A.M., Kozlov A.A.* Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29. – P. 743–746. – DOI: 10.3103/S1068798X09070223.

21. *Смирнов В.М., Тимофеев Д.А., Шалунов Е.П.* Дисперсно-упрочненная связка на основе порошковой меди для алмазного инструмента // Материалы II Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве». – Чебоксары, 2016. – С. 317–320.

22. *Bratan S., Roshchupkin S., Novikov P.* Modeling the grinding wheel working surface state // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1419–1425.

23. *Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Гайсин С.Н.* САПР оптимизации чистового шлифования плоских деталей 13Х15Н4АМ3 переменной жесткости по критерию шероховатости // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2005. – № 4. – С. 127–134.

24. *Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V.* Optimizing the grinding of high-speed steel by wheels of cubic boron nitride // Russian Engineering Research. – 2007. – Vol. 27, N 12. – P. 916–919. – DOI: 10.3103/S1068798X07120180.

25. *Popov V., Rychkov D., Arkhipov P.* Defects in diamonds as the basic adhesion grinding // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01003. – DOI: 10.1051/matecconf/201712901003.

26. *Архипов П.В., Потапова Г.Е.* Твердосплавные материалы и методы их обработки // Механики XXI веку. – 2012. – № 11. – С. 220–222.

27. Деформации в технологической системе при шлифовании / П.М. Салов, В.Н. Цай, С.С. Сайкин, Д.А. Юрпалов, Т.Г. Виноградова, Н.В. Мулюхин, Е.А. Андреева, Е.В. Антонова, Д.П. Салова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 44–46.

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

29. *Малышев В.И., Левашкин Д.Г., Селиванов А.С.* Автоматизация гибридных и комбинированных технологий на основе модернизации станочного оборудования и выбора кинематических связей // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2010. – № 3. – С. 70–74.

30. *Борисов М.А., Мишин В.А.* Влияние продолжительности импульсов тока на интенсивность электрохимического шлифования // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2019. – Т. 6, № 1–4. – С. 48–52.

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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 6–15
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Investigation of the Process of Automatic Control of Current Polarity Reversal in the Conditions of Hybrid Technology of Electrochemical Processing of Corrosion-Resistant Steels

Mikhail Borisov [1, a], ***Dmitry Lobanov*** [1, b, *], ***Alexander Yanyushkin*** [1, c], ***Vadim Skeeba*** [2, d]

[1] I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation
[2] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-9084-1820, borisovmgou@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-4273-5107, lobanovdv@list.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0003-1969-7840, yanyushkinas@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 25 November 2019
Revised: 21 December 2019
Accepted: 20 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Electrochemical grinding
Programmable device
Hybrid technology
Automatic control
Corrosion Resistant Steel

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. In various industries, heat-treated structural materials with enhanced physical and mechanical properties are increasingly used. Such materials include corrosion-resistant steels. These steels are used in mechanical engineering for the manufacture of parts and components of machines and mechanisms, in the petrochemical and gas processing industries, in the production and processing of food products, in pharmaceuticals for the manufacture of medical implements and equipment, and in medicine for the manufacture of prostheses. In modern production, along with traditional methods of intensification of technological operations, a direction is developing to increase the efficiency of machining by temporarily reducing the strength of the processed material, changing the mechanism of contact processes that occur on the working surfaces of tools and in the contact surface layer of the processed work pieces. In this case, combined and hybrid processing technologies are used. For processing complex products, it is possible to use a hybrid technology of electrochemical processing, in which periodic electrochemical dressing of the diamond wheel is carried out by changing the polarity of the current flowing along the chain directly during grinding without using an additional tool dressing chain. One of the main problems hindering the wide practical application of hybrid and combined technologies in industry is that to implement these technologies, equipment is needed that combines the main type of machining with additional energy sources, which can operate in automatic mode. This leads to the need to create special control systems for organizing hybrid and combined technologies in automated production conditions. **Purpose of work** is to increase the efficiency of hybrid technology for the electrochemical treatment of corrosion-resistant steels due to automatic control of the change in current polarity. **Results and discussion**. To accomplish this task, a programmable device for automatically controlling the reversal of current polarity in an electric circuit is developed and manufactured. It can implement two operating modes in turn. The first mode is electrochemical grinding of the part. The second mode is the electrochemical dressing of the diamond wheel. The study of the process of electrochemical grinding of samples made of 12Kh18N10T steel and electrochemical dressing of a diamond tool using a device for automatically controlling the change in current polarity is carried out on an original bench. To assess the quality parameters of the treated surface, the microhardness of the processed samples is measured on an HMV-G21S microhardness meter, the microrelief of the samples obtained using an AFM Solver Next scanning probe microscope is measured, and the surface roughness is measured on a Model 130 profilometer. Analysis of the results of the study suggests that the use of programmable device allows automating the process of controlling the change in polarity of the electric current without reducing the quality of surface grinding in hybrid technology of electrochemical treatment.

For citation: Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeeba V.Yu. Investigation of the Process of Automatic Control of Current Polarity Reversal in the Conditions of Hybrid Technology of Electrochemical Processing of Corrosion-Resistant Steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15. (In Russian).

*** Corresponding author**
Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky Prospekt,
428015, Cheboksary, Russian Federation
Tel.: + 7-908-303-47-45, **e-mail:** lobanovdv@list.ru

References

1. Vladimirova Yu.O., Shalunov E.P., Illarionov I.E. Raschet zagotovki porshnya iz ob"emnogo nanostrukturnogo materiala na osnove medi dlya mashin lit'ya pod davleniem [Calculation of plunger blank made of copper based volumetric nanostructured material for the die casting machines]. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva = Theory and Technology of Metallurgical Production*, 2019, no. 2, pp. 29–36.

2. Shalunov E.P., Smirnov V.M., Uryanskii I.P. Iznosostoikie podshipniki skol'zheniya iz nanostrukturnykh materialov dlya moshchnykh elektrodvigatelei [Wear-resistant sliding bearings using nanostructured materials for powerful electric motors]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta = Bulletin of the Chuvash University*, 2015, no. 1, pp. 131–139.

3. Soler Ya.I., Gaisin S.N., Kazimirov D.Yu. Prognozirovanie mikrorel'efa shlifovannykh detalei peremennoi zhestkosti iz stali 13Kh15N4AM3 pri mnogoprokhodnom s"eme pripuska [Prediction of the microrelief of polished parts of variable stiffness from steel 13X15H4AM3 with multi-pass stock removal]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2006, no. 1 (25), pp. 64–70.

4. Grigorenko V.B. Applications of corrosion-resistant steel. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, iss. 1, pp. 80–85. DOI: 10.3103/S0967091214010070.

5. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Bazarkina V.V. Sovershenstvovanie tekhnologii formoobrazovaniya vysokoprochnykh steklovoloknistykh kompozitsionnykh materialov na polimernoi osnove [Perfection of technology of formation of the form of high-strength glass-fiber composite materials on the polymeric basis]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3 (56), pp. 150–153.

6. Avrelkin V.A., Kuptsov M.V. [The use of improved technologies developed by scientists of the Volga region on the machine building enterprises of the Chuvash Republic]. *Innovatsionnye tekhnologii v metalloobrabotke*: *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya zaochnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation "Innovative technologies in metal processing"], Ulyanovsk, November 25, 2018. Ulyanovsk, 2019, pp. 158–163. (In Russian).

7. Vasil'ev E.V., Popov A.Y., Bugai I.A., Nazarov P.V. Axial tool for the machining of composites. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, pp. 771–772. DOI: 10.3103/S1068798X1510024X.

8. Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Sarazov A.V. Ploskoe shlifovanie tortsov kolets krupnogabaritnykh podshipnikov s trebuemym kachestvom poverkhnosti [Flat grinding of big bearing races end with the demanded quality of a surface]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the SUSU. Series "Mechanical Engineering Industry"*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 67–78.

9. Vereshchagina A.S., Voznyakovsky A.P., Grigorieva T.F., Kirillov O.N., Kozlov A.M., Kozlov A.A., Liopo V.A., Mandrykin A.V., Mokritsky B.Ya., Morozova A.V., Ovchinnikov E.V., Panaioti V.A., Petreshin D.I., Popov S.A., Prushak D.A., Ryazantsev A.Yu., Skrygin O.V., Smolentsev V.P., Struk V.A., Sianov S.Yu., Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Eisymont E.I. *Progressivnye mashinostroitel'nye tekhnologii, oborudovanie i instrumenty*. T. 5 [Advanced engineering techniques, equipment and tools. Vol. 5]. Moscow, Spektr Publ., 2015. 464 p. ISBN 978-5-4442-0088-9.

10. Chesov Yu.S., Ivancivsky V.V., Ptitsyn S.V. Tekhnologiya, oborudovanie i instrument dlya finishnykh operatsii [Technology, equipment and tools for finishing operations]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2001, no. 1 (12), pp. 52–54.

11. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeeba P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 125, iss. 1, p. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

12. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V. *Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-7782-3690-5.

13. Nosenko V.A., Zhukov V.K., Vasil'ev A.A., Nosenko S.V. Deep grinding of incomplete-cycle surfaces, with periodic straightening of the wheel. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, pp. 442–449. DOI: 10.3103/S1068798X08050109.

14. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01002. DOI: 10.1051/matecconf/201712901002.

15. Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D. Probabilistic approach for modeling electroerosion removal of grinding wheel bond. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1426–1431. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.656.

16. Bratan S.M., Bogutskii V.B., Novoselov Yu.K., Roshchupkin S.I. Modelirovanie protsessa stokhasticheskogo vzaimodeistviya instrumenta i zagotovki na operatsiyakh shlifovaniya [Process simulation of tool and blank stochastic interaction in grinding operations]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2017, no. 5 (71), pp. 9–18.

17. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Deep grinding of titanium alloy with continuous wheel correction. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, pp. 1124–1128. DOI: 10.3103/S1068798X10110110.

18. Sekletina L.S., Medvedeva O.I., Gartfel'der V.A., Yanyushkin A.R. Formirovanie poverkhnostnykh plenok pri shlifovanii tverdykh splavov krugami na tokoprovodyashchikh svyazkakh [Formation of surface films at grinding of hard alloys by wheels on current-conductive bindings]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana = Science and Technology of Kazakhstan*, 2018, no. 3, pp. 96–106.

19. Razhkovskii A.A., Kisel' A.G., Fedorov A.A., Rechenko D.S. Vliyanie SOZh na moment treniya pri obrabotke rezaniem stali U8 [Lubricant and cooling liquid influence at the moment of processing by U8 steel cutting]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 111–114.

20. Kozlov A.M., Kozlov A.A. Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, pp. 743–746. DOI: 10.3103/S1068798X09070223.

21. Smirnov V.M., Timofeev D.A., Shalunov E.P. [Dispersion strengthened sheaf on the basis of powder copper for the diamond tool]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii " Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i liteinom proizvodstve "* [Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Modern Technologies in Mechanical Engineering and Foundry"]. Cheboksary, 2016, pp. 317–320. (In Russian).

22. Bratan S., Roshchupkin S., Novikov P. Modeling the grinding wheel working surface state. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1419–1425. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.655.

23. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Gaisin S.N. SAPR optimizatsii chistovogo shlifovaniya ploskikh detalei 13Kh15N4AM3 peremennoi zhestkosti po kriteriyu sherokhovatosti [CAD optimization of fine grinding of flat parts 13X15H4AM3 of variable stiffness according to the roughness criterion]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii = New materials and technologies in mechanical engineering*, 2005, no. 4, pp. 127–134.

24. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V. Optimizing the grinding of high-speed steel by wheels of cubic boron nitride. *Russian Engineering Research*, 2007, vol. 27, no. 12, pp. 916–919. DOI: 10.3103/S1068798X07120180.

25. Popov V., Rychkov D., Arkhipov P. Defects in diamonds as the basic adhesion grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01003. DOI: 10.1051/matecconf/201712901003.

26. Arkhipov P.V., Potapova G.E. Tverdosplavnye materialy i metody ikh obrabotki [Carbide materials and methods for their processing]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanics of the XXI century*, 2012, no. 11, pp. 220–222.

27. Salov P.M., Tsai V.N., Saikin S.S., Yurpalov D.A., Vinogradova T.G., Mulyukhin N.V., Andreeva E.A., Antonova E.V., Salova D.P. Deformatsii v tekhnologicheskoi sisteme pri shlifovanii [Strain in grinding process in the system]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2016, no. 3, pp. 44–46.

28. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibridnaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnoprofil'nykh izdelii [Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

29. Malyshev V.I., Levashkin D.G., Selivanov A.S. Avtomatizatsiya gibridnykh i kombinirovannykh tekhnologii na osnove modernizatsii stanochnogo oborudovaniya i vybora kinematicheskikh svyazei [Hybrid and combined technologiesautomation are based on CNC – machine tool equipment modernization and kinematical connections choice]. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Vector of sciences. Togliatti State University,* 2010, no. 3, pp. 70–74.

30. Borisov M.A., Mishin V.A. Vliyanie prodolzhitel'nosti impul'sov toka na intensivnost' elektrokhimicheskogo shlifovaniya [The effect of current pulse duration on the intensity of electrochemical grinding]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 2019, vol. 6, no. 1–4, pp. 48–52.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 16–26
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-16-26

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Комплексный анализ процесса электроэрозионной обработки биметаллического материала сталь-медь

Евгений Шлыков [a,*], ***Тимур Абляз*** [b]

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

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.1.9

История статьи:
Поступила: 7 декабря 2019
Рецензирование: 19 декабря 2019
Принята к печати: 30 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Копировально-прошивная электроэрозионная обработка
Режимы резания
Электрод
Биметаллический материал

Финансирование
Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-2072.2019.8

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие современного машиностроения вызывает необходимость создания материалов, обладающих комплексом таких свойств, как прочность, коррозионная стойкость, теплопроводность, жаропрочность, износостойкость и др. При изготовлении новых видов изделий, обладающих сложным профилем, широкое применение находят биметаллические материалы. Для обработки таких изделий целесообразно применять электрофизические методы обработки, одним из которых является технология копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО). В настоящее время метод КПЭЭО является одним из самых распространенных методов обработки современных материалов. Статья посвящена повышению эффективности КПЭЭО биметаллических материалов типа сталь-медь. Предметами исследования являются: неравномерность съёма материала обработанной поверхности, параметр шероховатости при КПЭЭО биметаллического материала типа сталь-медь при различных режимах электроэрозионной обработки. **Целью работы** является повышение эффективности и точности процесса КПЭЭО сложнопрофильных биметаллических изделий электродами-инструментами (ЭИ) с различными физико-механическими свойствами. **Методы.** Экспериментальные исследования проводились по методу классического эксперимента. Для проведения экспериментов использовали копировально-прошивной электроэрозионный станок Smart CNC. В качестве биметаллического обрабатываемого изделия использована стальная подложка с наплавленным покрытием. Материал основы – сталь 09Г2С, материал наплавки – медь М1. В качестве электродов-инструментов использовали: сталь 20; дюралюминий марки Д16; медь М2. **Результаты и обсуждения.** Разработана теоретическая модель, позволяющая рассчитать величину съёма биметаллического материала сталь-медь в зависимости от режимов КПЭЭО и материала ЭИ. Сходимость теоретической модели с результатами экспериментов составляет 15 %. Проведено экспериментальное исследование износа ЭИ при КПЭЭО биметаллического материала сталь-медь в зависимости от режимов обработки и материала ЭИ. Установлено, что при КПЭЭО медным ЭИ на режимах med и max износ ЭИ минимален и составляет 0,03…0,05 мм соответственно. Проведён расчет параметров шероховатости и анализ обработанной поверхности биметаллического материала сталь-медь КПЭЭО на разных режимах обработки ЭИ с различными электрофизическими свойствами.

Для цитирования: *Шлыков Е.С., Абляз Т.Р.* Комплексный анализ процесса электроэрозионной обработки биметаллического материала сталь-медь // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 16–26. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-16-26.

Введение

Развитие современного машиностроения вызывает необходимость создания материалов, обладающих комплексом таких свойств, как прочность, коррозионная стойкость, теплопроводность, жаропрочность, износостойкость и др. При изготовлении новых видов изделий, обладающих сложным профилем, широкое применение находят биметаллические материалы [1]. Такие материалы изготавливаются соединением разнородных металлов в единую композицию, сохраняющую надежную связь [2, 3].

При традиционной лезвийной обработке биметаллических изделий сложного профиля неизбежным является наличие ударных нагрузок в зоне резанья, что приводит к снижению качества обработанной поверхности и увеличению износа инструмента. Зачастую твердость некоторых

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

биметаллов, в том числе наплавленных покрытий, превышает предел их обрабатываемости лезвийным инструментом, соответственно их обработка традиционными методами становится невозможной [4–6].

Для решения данной проблемы возможно применение копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО) [7]. В настоящее время метод КПЭЭО является одним из самых распространенных методов обработки изделий, выполненных из современных биметаллических материалов. При КПЭЭО изделий, выполненных из биметаллических материалов, физические процессы, протекающие на обрабатываемой поверхности, отличаются от процессов, характерных при обработке изделий из однородного материала [8–10]. Это связано с тем, что компоненты биметаллического материала обладают разными физико-механическими свойствами и электроэрозионной обрабатываемостью. В работе [11] установлено, что считая электроэрозионную обрабатываемость стали 40 за единицу, можно принять электроэрозионную обрабатываемость других металлов в следующем соотношении: твердый сплав – 0,5; вольфрам – 0,3; титан – 0,6; медь – 1,1; латунь – 1,6; никель – 0,8; алюминий – 4; магний – 6. В связи с этим процесс КПЭЭО сложнопрофильных изделий, выполненных из биметаллов с различной обрабатываемостью, будет протекать неравномерно.

В связи с тем что электроэрозионная стойкость элементов, входящих в состав изделия, выполненного из биметаллического материала, различна, в процессе КПЭЭО электрод-инструмент (ЭИ) подвергается неравномерному износу [12–14]. В процессе КПЭЭО плавится не только обрабатываемый биметаллический материал, но и непосредственно сам ЭИ, что ведет к неравномерному его износу при обработке таких изделий [15]. Неравномерный износ ЭИ приводит к снижению качества обработанной поверхности, уменьшению производительности и точности [16–18]. В настоящее время не до конца изучен вопрос электроэрозионной обработки биметаллических материалов.

Разнородность изделий, выполненных из биметаллических материалов, не позволяет в полной мере прогнозировать показатели качества и точности при разработке технологии КПЭЭО таких изделий с применением традиционных технологических таблиц [18]. В связи с этим достаточно сложно выдерживать критерии качества при высоких показателях производительности, что приводит к увеличению времени освоения новых изделий и понижает эффективность производства [18–22].

Актуальной задачей является получение теоретической зависимости влияния режимов КПЭЭО на производительность процесса, а также на формирование показателей качества обработанных поверхности изделий, выполненных из биметаллических материалов.

Цель работы: повышение эффективности и точности процесса КПЭЭО биметаллических изделий электродами-инструментами с различными физико-механическими свойствами.

Задачи

1. Разработать теоретическую модель, позволяющую описать взаимосвязь производительности съёма биметаллического материала сталь-медь в зависимости от режимов КПЭЭО и материала ЭИ.

2. Экспериментальное исследование износа ЭИ при КПЭЭО биметаллического материала сталь-медь в зависимости режимов КПЭЭО и материала ЭИ**.**

3. Провести анализ параметров качества и расчет параметров шероховатости обработанной поверхности биметаллического материала сталь-медь КПЭЭО на разных режимах обработки ЭИ с различными электрофизическими свойствами.

Методика исследований

В качестве биметаллического обрабатываемого изделия использована стальная подложка с наплавленным покрытием. Материал основы – сталь 09Г2С, ГОСТ 19281–89. Материал наплавки – медь М1, ГОСТ 859–2001.

Обработку биметаллической заготовки осуществляли на копировально-прошивном электроэрозионном станке Electronica Smart CNC.

В качестве ЭИ использовали: сталь 20 ГОСТ 1050–88; медь М2 ГОСТ 859–2001; дюралюминий Д16 ГОСТ 4784–74. Диаметр ЭИ составлял 8 мм; заданная глубина обработки – 5 мм. Рабочая жидкость (РЖ) – трансформаторное масло EDM Oil – IPOL SEO 450. В табл. 1 представлены режимы КПЭЭО.

Таблица 1

Table 1

Режимы КПЭЭО биметаллического материала

Processing modes bimetallic material

Режим	T_{on}, мкс	I_p, А	U, В
Минимальный	1	0,5	50
Медианный	100	3	50
Максимальный	750	20	50

Исследование рельефа обработанных поверхностей образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе (SEM) PhenomWorldG2 ProX при увеличениях x500-4000 и ускоряющем напряжении 15 кВ. Шероховатость поверхности после КПЭЭО оценивали с помощью лазерного сканирующего микроскопа Lext OLS4000 фирмы Olympus на 3D-модели изображения полученной при помощи программного модуля 3D Roughness Reconstruction.

Износ ЭИ замеряли на координатно-измерительной машине Carl Zeiss Contura G2.

Разработка теоретической модели проводилась согласно методике, представленной в работе [11]. Начальные условия и допущения теоретической модели: отсутствие диффузионного слоя, ЭИ однороден и совершает поступательное движение, свойства РЖ одинаковы по всей длине зазора между ЭИ и заготовкой.

Обрабатываемые поверхности ЭИ и заготовки могут быть заданы такими неявными функциями, как:

$$\begin{aligned} F_{ЭИ}(x,\ y,\ z+h,\ h) &= 0, \\ F_{з}\ (x,\ y,\ z,\ h) &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где x, y, z – декартовы координаты точек, расположенных на поверхности ЭИ и заготовки; $h = \int_0^t V_{ЭИ}\tau(d\tau)$ – расстояние, пройденное ЭИ вдоль оси z; $V_{ЭИ}(\tau)$ – скорость перемещения ЭИ в процессе обработки; t – время.

Результаты их обсуждение

Так как слои биметаллических изделий различаются по своим физико-механическим свойствам и по электроэрозионной обрабатываемости, то по истечении определенного времени с каждой части удаляется определенное количество материала. Минимальная величина межэлектродного зазора на одном из материалов превысит величину, необходимую для пробоя, что приведёт к неравномерности износа ЭИ [3]. В процессе КПЭЭО поверхности ЭИ и заготовки будут приобретать ярко выраженную ступенчатую форму со скругленными углами профиля.

Из формулы (1) выводим уравнения изменения поверхностей заготовки из биметалла и ЭИ в процессе обработки [3, 9–15]:

$$\begin{aligned} -qkV_{ЭЭО} \mid \operatorname{grad} F_{ЭИ} \mid + \frac{\partial F_{ЭИ}}{\partial h} + \frac{\partial F_{ЭИ}}{\partial (z+h)} &= 0, \\ -V_{ЭЭО}\ \mid \operatorname{grad} F_{з}\ \mid + \frac{\partial F_{з}}{\partial h} &= 0, \end{aligned} \tag{2}$$

где q – относительный объемный износ ЭИ; k – коэффициент, который учитывает кривизну ЭИ); $V_{ЭЭО}$ – скорость съема металла. Данные уравнения показаны на рис. 1 для случая однородного материала заготовки. Заменяем переменные:

$$\begin{aligned} T_{ЭИ}\ (x, y, z+h) &= F_{ЭИ}(x, y,\ z+h,\ h) - h, \\ T_{з}(x, y, z) &= F_{з}(x, y,\ z,\ h) - h. \end{aligned} \tag{3}$$

Зависимости (3) сводим к уравнениям типа эйконала:

$$\begin{aligned} \mid \operatorname{grad} F_{ЭИ} \mid &= \frac{1}{qkV_{ЭЭО}}\left(1 + \frac{\partial T_{ЭИ}}{\partial (z+h)}\right), \\ \mid \operatorname{grad} F_{ЭИ} \mid &= \frac{1}{V_{ЭЭО}}. \end{aligned} \tag{4}$$

Учитывая проведенные допущения, теоретическая модель принимает вид системы уравнений (4) для каждой части заготовки:

$$\begin{aligned} \mid \operatorname{grad} F_{ЭИ}\ \mid &= \frac{1}{qkV_{ЭЭО_1}}\left(1 + \frac{\partial T_{ЭИ_1}}{\partial (z+h)}\right), \\ \mid \operatorname{grad} F_{3_1}\ \mid &= \frac{1}{V_{ЭЭО_1}}, \\ \mid \operatorname{grad} F_{ЭИ_2}\ \mid &= \frac{1}{qkV_{ЭЭО_2}}\left(1 + \frac{\partial T_{ЭИ2}}{\partial (z+h)}\right), \\ \mid \operatorname{grad}\ F_{3_2}\ \mid &= \frac{1}{V_{ЭЭО_2}}, \end{aligned} \tag{5}$$

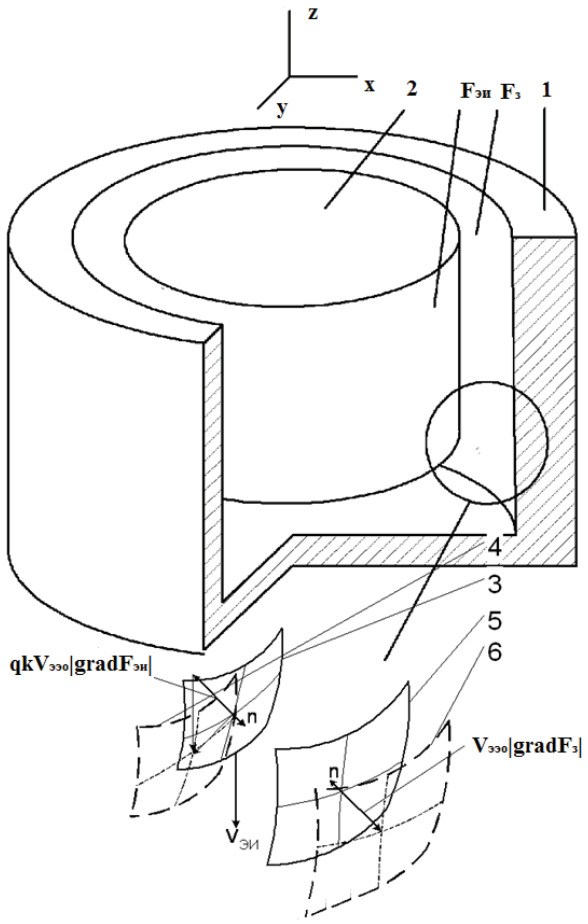


Рис. 1. Изменение поверхностей:

1 – обрабатываемая заготовка; *2* – электрод-инструмент; *3* – начальная поверхность электрода; *4* – измененная поверхность электрода; *5* – начальная поверхность заготовки; *6* – измененная поверхность заготовки

Fig. 1. Changing the surfaces:

1 – blank; *2* – electrode tool; *3* – the initial surface of the electrode; *4* – a modified surface of the electrode; *5* – the initial surface of the workpiece; *6* – changed surface of the workpiece

индексы 1 и 2 коррелируются с участками заготовки из разнородных материалов и соответствующим участкам ЭИ.

Скорость КПЭЭО заготовки можно рассчитать по зависимости

$$V_{ЭЭО} = C\rho\lambda T^2 W_и f, \quad (6)$$

где C – теплоемкость материала; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура плавления; $W_и$ – энергия импульсов; f – частота следования импульсов.

Согласно зависимости (6) количество материала, удаленного за время одного импульса, помимо энергии импульса зависит еще и от теплофизических свойств обрабатываемого материала таких, как температура плавления, теплопроводность, теплоемкость и плотность. Зная данные свойства компонентов биметаллического материала, возможно рассчитать скорость КПЭЭО для каждого из компонентов материала.

В табл. 2 представлены результаты расчета отношения скорости разрушения ЭИ при обработке биметаллического материала типа сталь-медь; 1 – участок ЭИ, соответствующий стальной части (скорость $V_{ЭЭО_1}$); 2 – участок ЭИ, соответствующий медной части заготовки (скорость $V_{ЭЭО_2}$).

Зная значение скорости КПЭЭО участков ЭИ из различных материалов обрабатываемой заготовки и считая время обработки постоянным, становится возможным рассчитать расстояние, пройденное ЭИ для каждого участка [3]:

$$h = \int_0^t V_{ЭИ}(\tau) d\tau. \quad (7)$$

В табл. 3 представлены результаты теоретического расчета съёма материала при обработке биметаллического материала сталь-медь. Неравномерность съёма материала можно рассчитать как разность расстояния, пройденного

Таблица 2

Table 2

Отношение скорости разрушения участков электродов

The ratio of the destruction rate of the electrode sections

Режим обработки	Дюралевый ЭИ	Стальной ЭИ	Медный ЭИ
	$V_{ЭЭО_1}/V_{ЭЭО_2}$	$V_{ЭЭО_1}/V_{ЭЭО_2}$	$V_{ЭЭО_1}/V_{ЭЭО_2}$
Минимальный	0,08	0,4	0,1
Медианный	0,53	0,53	0,02
Максимальный	0,4	0,33	0,06

Таблица 3
Table 3

Расчетные значения неравномерности съема материала при обработке биметаллического материала сталь-медь

The calculated values of the unevenness of material removal during processing of steel-copper bimetallic material

Режим обработки	Дюралевый ЭИ	Стальной ЭИ	Медный ЭИ
	$h_{сталь} - h_{медь}$	$h_{сталь} - h_{медь}$	$h_{сталь} - h_{медь}$
Минимальный	2,1	1,3	0,6
Медианный	1,6	1,5	0,3
Максимальный	1,8	1,4	0,1

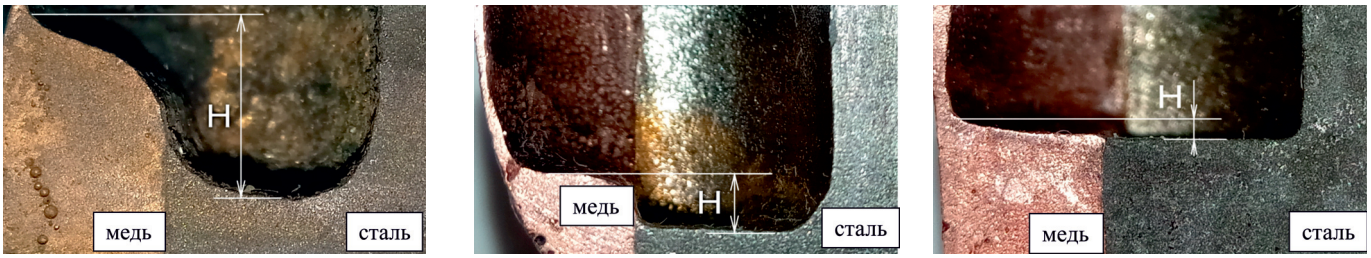
электродом при обработке стальной части биметаллического материала ($h_{сталь}$), и расстояния, пройденного электродом при обработке медной части ($h_{медь}$).

Установлено, что при КПЭЭО медным ЭИ неравномерность съёма материала наименьшая по сравнению с другими ЭИ. Для проверки теоретической модели проведены эксперименты по исследованию износа ЭИ и неравномерности съёма материала при КПЭЭО биметаллического материала типа сталь-медь разнородными ЭИ.

На рис. 2 показана неравномерность съёма материала при обработке тремя видами ЭИ: дюралевым, стальным и медным ЭИ на среднем режиме, где H – величина неравномерности съёма материала.

Сводные данные по всем режимам обработки для разнородных электродов приведены в табл. 4.

При КПЭЭО ЭИ из дюрали биметаллического материала типа сталь-медь наибольшая неравномерность съёма материала достигается



а *б* *в*

Рис. 2. Неравномерность съёма материала при обработке тремя видами ЭИ на среднем режиме:
а – дюралевый ЭИ; *б* – стальной ЭИ; *в* – медный ЭИ

Fig. 2. The unevenness of material removal during processing with three types of EI in the middle mode:
а – duralumin ET; *б* – steel ET; *в* – copper ETI

Таблица 4
Table 4

Неравномерность съёма материала при обработке разнородными ЭИ на трех режимах, *H*, мм

Uneven material removal during processing with heterogeneous EI in three modes, *H*, mm

Материал ЭИ	*H*, минимальный режим	*H*, медианный режим	*H*, максимальный режим
Дюраль	2,4	1,3	2
Сталь	1,5	1,8	1,7
Медь	0,9	0,1	0,2

на минимальных и максимальных режимах и составляет 2…2,4 мм. Во время КПЭЭО дюралевым ЭИ происходит его интенсивный износ. Это связано с тем, что электроэрозионная стойкость меди выше стойкости алюминия.

При обработке биметаллического образца стальным ЭИ максимальная неравномерность съёма материала достигается на медианном режиме и составляет 1,8 мм. Минимальная неравномерность съёма материала составляет 1,5 мм и достигается на минимальных режимах. Это можно объяснить тем, что при обработке материалов, обладающих высокой теплопроводностью, необходимо подбирать минимальные режимы обработки, при которых тепло распределяется равномерно по всему объёму обрабатываемой детали и не приводит к ее перегреву.

При обработке медным ЭИ наибольшая неравномерность съёма материала достигнута на максимальном режиме КПЭЭО и составляет 0,9 мм. Минимальная неравномерность съёма материала – на медиальных и максимальных режимах, она составляет 0,1…0,2 мм.

Целесообразно обрабатывать биметаллический материал типа сталь-медь на медианном и максимальном режимах и получать при этом наименьшую неравномерность обработки.

Сравнение значений неравномерности съёма биметаллического материала сталь-медь, полученных теоретическим методом, и значений, полученных практическим методом, показало расхождение порядка 15 %.

Помимо биметаллического материала типа сталь-медь образование неравномерности происходит также на ЭИ. На рис. 3 представлена схема образования неравномерности на дюралевом ЭИ при обработке на медианном режиме, где h – неравномерность износа ЭИ. Сводные

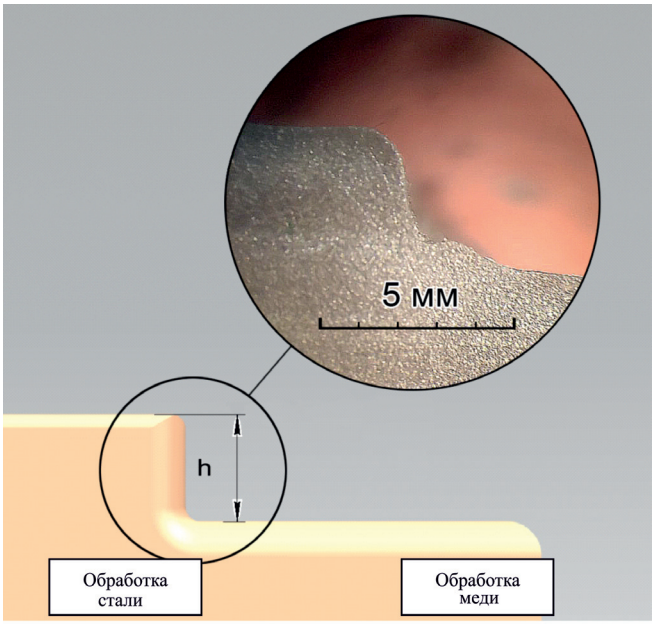


Рис. 3. Неравномерность износа ЭИ при обработке дюралевым ЭИ на среднем режиме

Fig. 3. Uneven wear of EI during duralumin EI processing in medium mode

данные износа разнородных ЭИ по всем режимам обработки приведены в табл. 5.

При КПЭОО дюралевым ЭИ на медианном режиме можно наблюдать значительное разрушение ЭИ. Происходили постоянные остановки КПЭЭО. Данное явление было вызвано интенсивным налипанием шлама, образовывающегося из-за низкой эрозионной стойкости ЭИ из данного материала.

КПЭЭО стальным ЭИ показала относительно равные результаты износа ЭИ на всех режимах. Помимо неравномерности съёма материала можно увидеть наросты на ЭИ. Данные наросты значительно ухудшают качество электроэрозионной обработки. Разрушение ЭИ в первую очередь зависит от теплофизических свойств материала – температуры плавления и теплопро-

Таблица 5

Table 5

Неравномерность износа разнородных ЭИ при обработке на трех режимах, *H*, мм

Uneven material removal during processing with heterogeneous ET in three modes, *H*, mm

Материал ЭИ	*H*, минимальный режим	*H*, медианный режим	*H*, максимальный режим
Дюраль	1,6	2,6	1,2
Сталь	1,8	1,6	1,5
Медь	0,7	0,05	0,03

водности. Нагрев обрабатываемой поверхности биметаллического материала, обладающего большей теплопроводностью при одинаковой величине энергии импульса, меньше, так как с большей скоростью он уходит внутрь материала.

Медные ЭИ позволяют обеспечить высокую производительность КПЭЭО и стабильное течение этого процесса. При электроэрозионной обработке медным ЭИ на медианном и максимальном режимах износ ЭИ получился минимальным и составляет 0,03…0,05 мм соответственно [15].

В настоящей статье проведено исследование параметра шероховатости обработанной поверхности биметаллического материала сталь-медь после обработки разнородными ЭИ на трех режимах. Результаты измерения шероховатости представлены в табл. 6.

На рис. 4 представлен рельеф обработанной поверхности материала стали на медианном режиме обработки тремя разнородными ЭИ.

Отличительной чертой обработанной поверхности стали биметаллического материала являются микротрещины по границам зерен. При обработке стального слоя наибольшее количество микротрещин наблюдается при обработке стальным ЭИ. Обработка стальным и дюралевым ЭИ приводит к образованию сколов и увеличению размера микротрещин на обработанной поверхности.

После обработки поверхности стали биметаллического материала медным ЭИ видны сле-

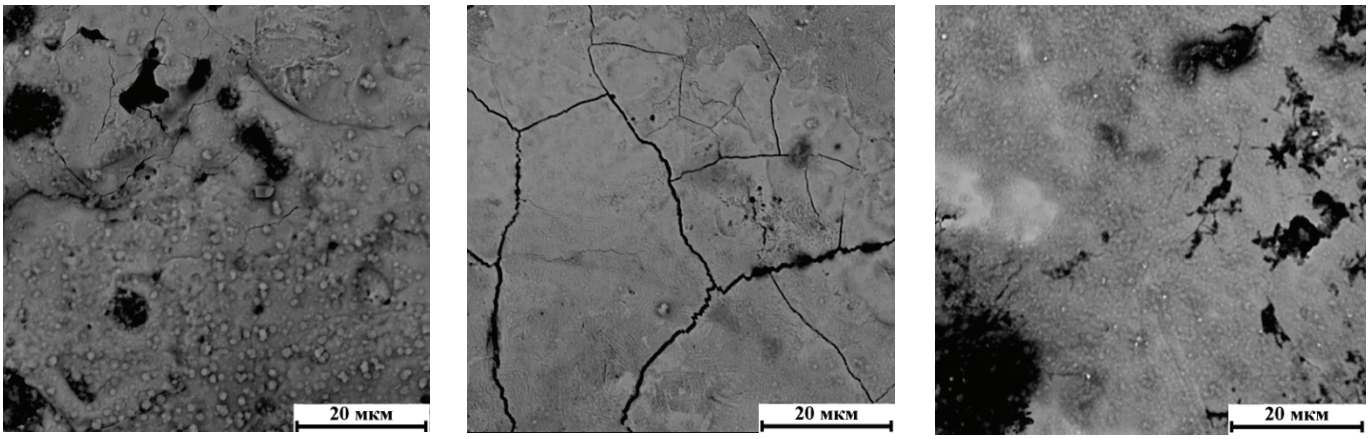
Таблица 6

Table 6

Параметр шероховатости биметаллического материала при обработке разнородными ЭИ на трех режимах

Roughness parameter of bimetallic material when processing heterogeneous ET in three modes

Материал ЭИ	Минимальный режим		Медианный режим		Максимальный режим	
	Ra на меди, мкм	*Ra* на стали, мкм	*Ra* на меди, мкм	*Ra* на стали, мкм	*Ra* на меди, мкм	*Ra* на стали, мкм
Дюраль	1,8	0,8	2,7	1,3	3,6	1,9
Сталь	4	1,9	6,1	3,2	8,9	4,4
Медь	7	3	9,1	4,6	12,2	6,1



а *б* *в*

Рис. 4. Обработанная поверхность стального слоя биметаллического материала:

а – дюралевый ЭИ; *б* – стальной ЭИ; *в* – медный ЭИ

Fig. 4. The processed surface of the steel layer of bimetallic material:

а – duralumin ET; *б* – steel ET; *в* – copper ETI

ды застывшего материала ЭИ. Такие наплавленные частицы медного ЭИ покрывают стальную поверхность неравномерно. Можно заметить формирование микротрещин на застывшем материале электрода-инструмента. Присутствие таких микротрещин на поверхности стального слоя может привести к возникновению макродефектов данного слоя и понижению эксплуатационных свойств детали, выполненной из данного материала.

На рис. 5 представлен рельеф обработанной поверхности материала меди на медианном режиме обработки тремя разнородными ЭИ.

Отличительной чертой обработанной поверхности меди биметаллического материала является наличие микронеровностей, образующих общую структуру поверхности разрушения в форме паутины и объединённых крупных лунок, имеющих кубическое строение. Образование подобных элементов на медной поверхности биметалла после КПЭЭО носит комплексный характер.

Показано, что обработка медного биметаллического слоя дюралевым ЭИ приводит к образованию структуры обработанной поверхности в форме паутины и образованию объединённых лунок малых размеров, имеющих кубическое строение. Обработка на данном режиме стальным ЭИ приводит к увеличению размеров объединённых лунок. Наибольшие размеры таких лунок на обработанной поверхности меди можно наблюдать после обработки медным ЭИ.

Выводы

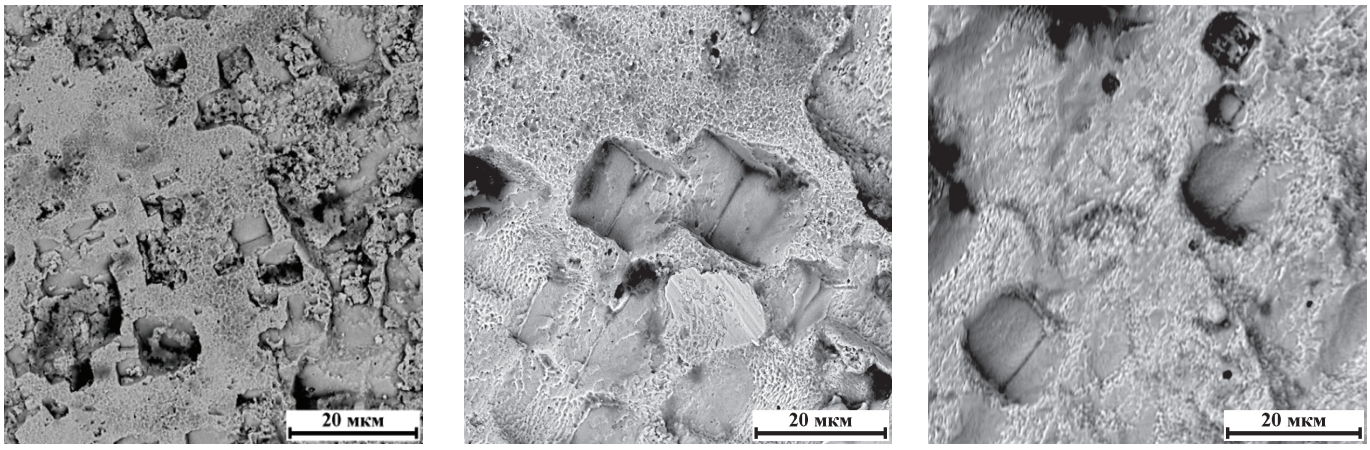
1. Разработана теоретическая модель, позволяющая рассчитать величину съёма биметаллического материала съёма сталь-медь в зависимости от режимов КПЭЭО и материала ЭИ. Сходимость теоретической модели с результатам экспериментальных исследований составляет 15 %.

2. Проведено экспериментальное исследование износа ЭИ при КПЭЭО биметаллического материала сталь-медь в зависимости от режимов КПЭЭО и материала ЭИ. Установлено, что при КПЭЭО медным ЭИ на режимах медианном и максимальном износ ЭИ минимален и составляет 0,03…0,05 мм соответственно.

3. Проведенный расчет и анализ параметра качества обработанной поверхности биметаллического материала сталь-медь КПЭЭО на разных режимах обработки ЭИ с различными электрофизическими свойствами установил, что во время обработки стального слоя независимо от материала ЭИ образуются микротрещины по границам зерен, а во время обработки медного слоя происходит образование укрупнённых лунок. Данные явления приводят к ухудшению эксплуатационных свойств обрабатываемой детали.

Список литературы

1. Особенности применения композиционного материала «алюминий – нитрид бора» в авиационных двигателях / А.А. Живушкин, Е.А. Козлова, И.А. Чубуков, А.Ю. Марова // Вестник Самарского



а *б* *в*

Рис. 5. Обработанная поверхность медного слоя биметаллического материала:
а – дюралевый ЭИ; *б* – стальной ЭИ; *в* – медный ЭИ

Fig. 5. The processed surface of the copper layer of bimetallic material:
а – duralumin ET; *б* – steel ET; *в* – copper ETI

государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 3 (19). – С. 235–239.

2. *Голованенко С.А., Меандров Л.В.* Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966. – 132 с.

3. *Матвеев А.С., Матвеев М.С.* Особенности применения конструкционных материалов при изготовлении электродов вакуумных приборов // Конструкции из композиционных материалов. – 2010. – № 2. – С. 28–31.

4. *Грицюк В.Г.* Режимы и технология обработки биметаллов с наложением электрического поля: дис.... канд. техн. наук: 05.03.01. – Воронеж, 2005. – 201 с.

5. Плазменная наплавка меди на сталь на токе обратной полярности / С.Д. Неулыбин, Ю.Д. Шицын, П.С. Кучев, И.А. Гилев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1 (2). – С. 468–471.

6. *Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г.* Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 112 с.

7. *Погонин А.А., Бойко А.Ф., Блинова Т.А.* Дисперсный анализ продуктов электроэрозионной прецизионной обработки // Технология машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 26–28.

8. *Слюсарев М.В.* Исследование параметров качества биметаллических листов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 9. – 2007. – Вып. 6. – С. 176–182.

9. *Lee H.T., Tai T.Y.* Relationship between EDM parameters and surface crack formation // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 142, iss. 3. – P. 676–683. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00688-5.

10. *Das S., Klotz M., Klocke F.* EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 142, iss. 2. – P. 434–451. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00624-1.

11. *Журин А.В.* Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01. – Тула, 2005. – 132 с.

12. *Tang J., Yang X.* A thermo-hydraulic modeling for the formation process of the discharge crater in EDM // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 685–690. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.302.

13. *Tsai H.C., Yan B.H., Huang F.Y.* EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43, iss. 3. – P. 245–252. – DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00238-9.

14. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining / S. Hayakawa, Y. Sasaki, F. Itoigawa, T. Nakamura // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6. – P. 174–179. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.095.

15. *Шлыков Е.С., Сиротенко Л.Д.* Особенности обработки биметаллических материалов электродами с разными физико-механическими свойствами // Журнал магистров. – 2016. – № 1. – С. 199–203.

16. *Плошкин В.В.* Структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при электроэрозионной обработке: дис. … канд. техн. наук. – М., 2006. – 281 с.

17. *Tao J., Ni J., Shih A.J.* Modeling of the anode crater formation in electrical discharge machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – Vol. 134 (1). – P. 011002. – DOI: 10.1115/1.4005303.

18. *Dey S., Roy D.C.* Experimental study using different tools/electrodes E.G. copper, graphite on M.R.R of E.D.M process and selecting the best one for maximum M.R.R in optimum condition // International Journal of Modern Engineering Research. – 2013. – Vol. 3, iss. 3. – P. 1263–1267.

19. *Weingärtner E., Kuster F., Wegener K.* Modeling and simulation of electrical discharge machining // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 2. – P. 74–78. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.043.

20. *Janmanee P., Muttamara A.* Performance of difference electrode materials in electrical discharge machining of tungsten carbide // Energy Research Journal. – 2010. – Vol. 1, iss. 2. – P. 87–90. – DOI: 10.3844/erjsp.2010.87.90.

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

22. *Yeo S.H., Kurnia W., Tan P.C.* Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Vol. 40 (8). – P. 2513–2521. – DOI: 10.1088/0022-3727/40/8/015.

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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 16–26
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-16-26

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Complex Analysis of the Process of Electrical Discharge Machining of Bimetallic Steel-Copper Material

Evgenii Shlykov [a, *], ***Timir Ablyaz*** [b]

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

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

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 7 December 2019
Revised: 19 December 2019
Accepted: 30 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Copy-piercing electrical discharge machining
Cutting conditions
Electrode
Bimetallic material

Funding
This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian doctors of science No. MK-2072.2019.8

ABSTRACT

Introduction. The development of modern engineering necessitates the creation of materials with a combination of properties such as strength, corrosion resistance, heat conductivity, heat resistance, wear resistance, etc. In the manufacture of new types of products with a complex profile, bimetallic materials are widely used. For processing such products, it is advisable to use electrophysical processing methods, one of which is the technology of copy-piercing electrical discharge machining (EDM). Currently, the EDM method is one of the most common methods for processing modern materials. The paper is devoted to improving the efficiency of the EDM of bimetallic materials such as steel-copper. Subjects of research are: unevenness of the material removal of the treated surface, the roughness parameter during the EDM of a steel-copper type bimetallic material under various modes of electric discharge machining. **The aim of the work** is to increase the efficiency and accuracy of the EDM process of complex-profile bimetallic products electrode tool (ET) with various physical and mechanical properties. **Methods.** Experimental studies were carried out according to the classical experiment. For the experiments, a copy-piercing electrical discharge EDM machine Smart CNC was used. As a bimetallic processed product, a steel substrate with a deposited coating was used. The base material is steel 09G2S, the surfacing material is M1 copper. As electrode electrodes used: steel 20; duralumin grade D16; copper M2. **Results and Discussion.** A theoretical model is developed that allows one to calculate the amount of removal of the bimetallic material for steel-copper removal depending on the regimes of EDM and material ET. The convergence of the theoretical model with the results of experimental studies is 15%. An experimental study was made of the wear of ET during the EDM of a bimetallic steel-copper material depending on the modes of EDM and the material of the ET. It is established that during EDM of copper ET in the med and max modes, the wear of ET is minimal and amounts to 0.03 - 0.05 mm, respectively. The roughness parameters are calculated and the treated surface of the bimetallic steel-copper EDM bimetallic material is analyzed at different modes of processing ET with various electrophysical properties.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R. Complex Analysis of the Process of Electrical Discharge Machining of Bimetallic Steel-Copper Material. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 16–26. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-16-26. (In Russian).

References

1. Zhivushkin A.A., Kozlova E.A., Chubukov I.A., Marova A.Yu. Osobennosti primeneniya kompozitsionnogo materiala "alyuminii – nitrid bora" v aviatsionnykh dvigatelyakh [Features of application of aluminium – boron nitride composite material in aviation engines]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Vestnik of Samara University: Aerospace and Mechanical Engineering*, 2009, no. 3 (19), pp. 235–239.

2. Golovanenko S.A., Meandrov L.V. *Proizvodstvo bimetallov* [Bimetal production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 132 p.

3. Matveev A.S., Matveev M.S. Osobennosti primeneniya konstruktsionnykh materialov pri izgotovlenii elektrodov vakuumnykh priborov [The structural materials features for manufacture vacuum equipment's electrodes]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*, 2010, no. 2, pp. 28–31.

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

4. Gritsyuk V.G. *Rezhimy i tekhnologiya obrabotki bimetallov s nalozheniem elektricheskogo polya.* Diss. kand. tekhn. nauk [Modes and processing technology of bimetals with the application of an electric field. PhD eng. sci. diss.]. Voronezh, 2005. 201 p.

5. Neulybin S.D., Shitsyn Yu.D., Kuchev P.S., Gilev I.A. Plazmennaya naplavka medi na stal' na toke obratnoi polyarnosti [Plasma surfacing of copper on steel at opposite polarity current]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 1–2, pp. 468–471.

6. Ablyaz T.R., Khanov A.M., Khurmatullin O.G. *Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov* [Modern approaches to the technology of electric discharge machining of materials]. Perm', 2012. 112 p.

7. Pogonin A.A., Boiko A.F., Blinova T.A. Dispersnyi analiz produktov elektroerozionnoi pretsizionnoi obrabotki [The disperse analysis of products of electroerosive precision processing]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya = Engineering Technology*, 2010, no. 6, pp. 26–28.

8. Slyusarev M.V. Issledovanie parametrov kachestva bimetallicheskikh listov [The study of the quality parameters of bimetallic sheets]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 9, Issledovaniya molodykh uchenykh = Science Journal of Volgograd State University. Young Scientists' Research*, 2007, no. 6, pp. 176–182.

9. Lee H.T., Tai T.Y. Relationship between EDM parameters and surface crack formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 142, iss. 3, pp. 676–683. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00688-5.

10. Das S., Klotz M., Klocke F. EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 142, iss. 2, pp. 434–451. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00624-1.

11. Zhurin A.V. *Metody rascheta tekhnologicheskikh parametrov i elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke*. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods for calculating process parameters and tool electrodes in EDM. PhD eng. sci. diss.]. Tula, 2005. 132 p.

12. Tang J., Yang X. A thermo-hydraulic modeling for the formation process of the discharge crater in EDM. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 685–690. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.302.

13. Tsai H.C., Yan B.H., Huang F.Y. EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, iss. 3, pp. 245–252. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00238-9.

14. Hayakawa S., Sasaki Y., Itoigawa F., Nakamura T. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 174–179. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.095.

15. Shlykov E.S., Sirotenko L.D. Osobennosti obrabotki bimetallicheskikh materialov elektrodami s raznymi fiziko-mekhanicheskimi svoistvami [Special aspects of bimetal processing with electrode with physical and mechanical properties]. *Zhurnal magistrov = Masters Journal*, 2016, no. 1, pp. 199–203.

16. Ploshkin V.V. *Strukturnye i fazovye prevrashcheniya v poverkhnostnykh sloyakh stalei pri elektroerozionnoi obrabotke.* Diss. kand. tekhn.nauk [Structural and phase transformations in the surface layers of steels during electrical discharge machining. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2006. 281 p.

17. Tao J., Ni J., Shih A.J. Modeling of the anode crater formation in electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2012, vol. 134 (1), p. 011002. DOI: 10.1115/1.4005303.

18. Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools/electrodes E.G. copper, graphite on M.R.R of E.D.M process and selecting the best one for maximum M.R.R in optimum condition. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 1263–1267.

19. Weingärtner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 2, pp. 74–78. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.043.

20. Janmanee P., Muttamara A. Performance of difference electrode materials in electrical discharge machining of tungsten carbide. *Energy Research Journal*, 2010, vol. 1, iss. 2, pp. 87–90. DOI: 10.3844/erjsp.2010.87.90.

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

22. Yeo S.H., Kurnia W., Tan P.C. Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 40 (8), pp. 2513–2521. DOI: 10.1088/0022-3727/40/8/015.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 27–40
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах

Александр Ингеманссон*

АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», пр. Ленина, б/н, г. Волгоград, 400071, Россия

https://orcid.org/0000-0002-7963-393X, aleing@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК621.9.025

История статьи:
Поступила: 22 ноября 2019
Рецензирование: 28 декабря 2019
Принята к печати: 30 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Технологическая подготовка производства
Обработка резанием
Адаптивное управление
Математические модели
Цифровые производственные системы

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка наукоемких решений в области технологического обеспечения стабильности получения качества обработанной поверхности и работоспособности режущего инструмента является современным направлением повышения эффективности технологических процессов механической обработки. Особое значение данная проблема приобретает для производственных систем, использующих автоматизированное оборудование, в частности, для цифровых производственных систем (ЦПС), т. е. она связана с реализацией концепции «индустрия 4.0» в промышленности. Нестабильность процесса резания выражается в колебании температурно-силовых характеристик процессов стружкообразования и контактного взаимодействия и провоцирует непостоянство получаемого качества обработанных поверхностей и работоспособности режущего инструмента. Адаптивное управление позволяет повысить стабильность выходных параметров процесса резания при колебаниях состояния технологической системы. На основе использования возможностей современного оборудования с ЧПУ предлагается адаптивное управление режимами резания с целью повышения эффективности технологических процессов механической обработки. **Цель работы:** разработка и обоснование математических моделей влияния режимов и параметров процесса обработки на функциональные и выходные параметры точения и фрезерования для технологической подготовки производства (ТПП) и адаптивного управления процессом резания в ЦПС. **Методами исследования** являются планирование многоуровневых полных факторных экспериментов с учетом анализа наиболее распространенных обрабатываемых и инструментальных материалов, режимов и условий обработки при точении и фрезеровании на станках с ЧПУ, статистическая обработка результатов экспериментов и регрессионный анализ, анализ разработанных математических моделей с позиции теории и физических основ процесса резания. **Результаты и обсуждение.** На основе проведенных экспериментальных исследований, построения математических моделей и анализа полученных результатов получены расчетные формулы для определения среднего арифметического отклонения профиля *Ra* и среднего шага неровностей профиля *Sm* обработанной поверхности, подачи и силы резания при точении и фрезеровании. Представленные математические модели описывают закономерности формирования функциональных и выходных параметров обработки резанием и предназначены для ТПП и для адаптивного управления современным автоматизированным оборудованием с ЧПУ в ЦПС для механической обработки. Анализ разработанных математических моделей обнаружил закономерности формирования микрогеометрии обработанной поверхности и силы резания, т.е. нагрузки на инструмент, с позиции теории резания и температурно-деформационных закономерностей высокоскоростного пластического деформирования.

Для цитирования: *Ингеманссон А.Р.* Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 27–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40.

Введение

Реализация концепции «индустрия 4.0» в промышленности означает внедрение цифровых производственных систем (ЦПС), в которых технологическое оборудование и оснащение, материалы и изделия являются активными системными компонентами, самостоятельно

***Адрес для переписки**
Ингеманссон Александр Рональдович, к.т.н., главный технолог
АО «Федеральный научно-производственный центр
«Титан-Баррикады»
пр. Ленина, б/н
400071, г. Волгоград, Россия
Тел.: 8 (8442) 74-90-74, **e-mail:** aleing@yandex.ru

управляющими своими технологическими и логистическими процессами. Преимущества от внедрения ЦПС должны быть реализованы прежде всего в механообрабатывающем производстве [1–3].

Разработка наукоемких решений в области технологического обеспечения стабильности получения качества обработанной поверхности и работоспособности режущего инструмента является современным направлением повышения эффективности технологических процессов механической обработки. Особое значение данная проблема приобретает для производственных систем, использующих автоматизированное оборудование, в частности, для цифровых производственных систем (ЦПС).

Нестабильность процесса резания выражается в колебании температурно-силовых характеристик процессов стружкообразования и контактного взаимодействия и провоцирует непостоянство получаемого качества обработанных поверхностей и работоспособности режущего инструмента. Среди факторов, оказывающих влияние на возмущения системы, отметим следующие: непостоянство физико-механических свойств обрабатываемого материала, непостоянство припуска, колебания жесткости и температурные деформации элементов технологической системы, изнашивание режущего инструмента и др. [4, 5].

Адаптивное управление позволяет повысить стабильность выходных параметров процесса резания при колебаниях состояния технологической системы [6–8]. На основе использования возможностей современного оборудования с ЧПУ [9] предлагается адаптивное управление режимами резания с целью повышения эффективности технологических процессов механической обработки.

Предлагаемый подход для реализации в ЦПС для механической обработки заключается в следующем.

Современное металлорежущее оборудование с ЧПУ позволяет получать данные о текущей потребляемой мощности приводом главного движения или крутящем моменте, осуществлять мониторинг и автоматическое управление на основе данных по нагрузке на привод. Указанные параметры нагрузки непосредственно определяются силой резания. Главной составляющей силы резания является тангенциальная *Pz*. Величина силы резания является функциональной, динамичной характеристикой температурно-деформационных процессов стружкообразования и контактного взаимодействия. Автоматическая корректировка режимов резания, в частности подачи, по запрограммированному алгоритму во время обработки в зависимости от изменяющейся нагрузки на привод станка позволяет повысить стабильность процесса образования обработанных поверхностей и стабильность стойкости режущего инструмента. Таким образом, адаптивное управление процессом резания для современного автоматизированного оборудования с ЧПУ с целью получения заданных значений выходных параметров обработки целесообразно выполнять по величине силы резания. В качестве выходных параметров процесса резания, определяющих эффективность обработки, целесообразно принять шероховатость обработанной поверхности и период работоспособности инструмента. Кроме этого необходимо учитывать физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей, измененное в результате обработки.

Современные системы ЧПУ металлорежущего оборудования функционально позволяют выполнять адаптивное управление рабочей подачей. Однако на сегодняшний день отсутствуют комплексные методики, математические модели и программные продукты управления качеством обработки и стойкостью инструмента на основе указанного функционала. Выпускаемые продукты в основном ограничиваются защитой инструмента от поломки, а управляющее воздействие нередко выражается в выдаче предупреждающего сообщения для оператора ОЦ или аварийной остановке станка. Таким образом, разработка принципов и математических моделей для адаптивного управления процессом резания в ЦПС является актуальным научным направлением. Подача является целесообразным для выбора управляющим параметром, так как адаптивное управление подачей технически осуществимо на современном серийно выпускаемом оборудовании с ЧПУ; среди режимов резания подача имеет наибольшее влияние на шероховатость обработанной

поверхности и оказывает существенное влияние на стойкость инструмента.

В связи с этим цель настоящей работы заключается в разработке и обосновании математических моделей влияния режимов и параметров процесса обработки на функциональные и выходные параметры точения и фрезерования для последующего применения при технологической подготовке производства (ТПП) и адаптивном управлении процессом резания в ЦПС.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, выполнить выбор характеристик функции отклика, а также режимов и условий механической обработки, инструментальных и обрабатываемых материалов, выступающих в качестве влияющих факторов. Во-вторых, осуществить планирование, выполнить многоуровневые полные факторные эксперименты и провести статистическую обработку их результатов с получением математических моделей. В-третьих, провести анализ полученных математических зависимостей с позиции температурно-деформационных закономерностей процесса резания.

Методика исследований

В качестве характеристики функции отклика при обработке в материалах данного исследования выступают среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, мкм, средний шаг неровностей профиля *Sm*, мм, и нагрузка на режущий инструмент, которая выражается через силу резания *Pz*, Н.

Согласно принятым методикам назначения режимов резания на основе справочно-нормативной литературы [10–16] глубина резания *t* для предварительного точения и фрезерования была принята равной 2 мм, для чистового точения и фрезерования – 0,5 мм.

В качестве обрабатываемых материалов рассмотрены конструкционные углеродистые и легированные стали – группа «P» согласно международному стандарту ISO и коррозионно-стойкие – группа «M», как наиболее распространенные в машиностроении. Для построения математических моделей в настоящей работе в роли фактора, определяющего свойства обрабатываемого материала, оказывающего значительное влияние на температурно-деформационные характеристики, функциональные и выходные параметры процесса резания, а также широко используемого в производственной практике, принята твердость, HV.

В качестве типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей использовалась сталь 40Х ГОСТ 4543–2016, а коррозионно-стойких сталей – сталь 20Х13 ГОСТ 5949–2018. Для задач многоуровневого полного факторного эксперимента на основе анализа конструкторской документации были определены наиболее распространенные механические свойства, предъявляемые к деталям из стали 40Х и 20Х13. На основе данного анализа были назначены режимы термической обработки при проведении экспериментов для трех уровней варьирования фактора твердости обрабатываемого материала.

Выбор геометрии и конструкции режущего инструмента также осуществлялся исходя из справочно-нормативных рекомендаций и на основе производственной практики механообрабатывающих участков.

Наиболее универсальными сменными многогранными пластинами (СМП) для токарной обработки с ЧПУ являются пластины ромбической формы с углом при вершине 80º, форма «C» согласно ISO 1832–1991. Наиболее широко применяемыми при чистовой и получистовой токарной обработке являются СМП с $r = 0{,}8$ мм. Таким образом, на основе проведенного анализа были назначены СМП геометрии и размера CNMG 120408 согласно ISO 1832–1991.

Более часто применяемым и универсальным инструментом для фрезерной обработки с ЧПУ являются концевые фрезы, позволяющие выполнять операции торцевого фрезерования, обработки уступов, отверстий и пазов, профильного и плунжерного фрезерования и др. [16] В качестве типового представителя данного вида инструмента были применены концевые фрезы с цилиндрическим хвостовиком, оснащенные твердосплавными СМП. Корпус фрезы – ST20-FCM20093-110, диаметр режущей части – 20 мм («Big Daishowa», Япония) [15]. В качестве типовой операции была назначена обработка плоскости (полки уступа) торцом инструмента при попутном асимметричном фрезеровании. Использовались твердосплавные

СМП r = 0,4 мм, как наиболее универсальные для чистовой и получистовой фрезерной обработки.

В качестве фактора, определяющего свойства инструментального материала, оказывающего значительное влияние на температурно-деформационные характеристики, функциональные и выходные параметры процесса резания, а также доступного из справочно-нормативной литературы или из разработанных практических рекомендаций [17], принята теплопроводность λ, Вт/м · К.

Исходя из различных теплопроводностей инструментальных материалов, видов обработки, а также применяемых инструментов при обработке рассматриваемых групп сталей назначены следующие виды твердых сплавов [17]. Для токарной обработки конструкционных углеродистых и легированных сталей (группа «Р») – твердосплавные СМП с CVD-покрытием NC3215, твердосплавные СМП без покрытия H01 и безвольфрамовые твердосплавные (керметы) СМП без покрытия – CN2500 для предварительного точения и CN1500 для чистового точения. Для токарной обработки коррозионно-стойких сталей (группа «М») – твердосплавные СМП с CVD-покрытием NC5330, твердосплавные СМП без покрытия H01 и безвольфрамовые твердосплавные (керметы) СМП без покрытия – CN2500 для предварительного точения и CN1500 для чистового точения (все «Korloy», Ю. Корея) [14]. Для фрезерной обработки сталей групп «Р» и «М» использовались твердосплавные СМП с PVD-покрытием ACP 200, ACP 300 и ACZ350S (все «Big Daishowa» («Sumitomo»), Япония) [15].

Диапазоны варьирования факторов скорости резания и подачи для предварительной и чистовой обработки устанавливались согласно принятым методикам назначения режимов резания на основе справочно-нормативной литературы [10–16]. Обработка выполнялась без СОТС, точение – на токарном ОЦ с ЧПУ мод. SL-40L, фрезерование – на горизонтальном сверлильно-фрезерно-расточном ОЦ с ЧПУ мод. EC-1600 (все «Haas Automation», США).

Построение математических моделей выполнялось исходя из результатов многоуровневых полных факторных экспериментов. Минимальный объем статистической выборки, на основании которой осуществлялось моделирование, определялся по зависимости

$$k_{\min} = 3^n = 3^4 = 81, \qquad (1)$$

где $k_{\min}$ – минимально необходимое и достаточное количество независимых комбинаций опытов при полном факторном эксперименте; n – количество факторов.

При исследованиях выполнялось построение и последующее сравнение математических моделей следующих спецификаций: линейной, степенной и показательной как наиболее часто рассматриваемых. Оценка статистической значимости и определение степени влияния обсуждаемых факторов выполнялись с помощью критерия Стьюдента. Оценка адекватности построенных моделей выполнялась по величине критерия Фишера. Средняя относительная погрешность (расхождение значений среднего арифметического отклонения профиля *Ra*, среднего шага неровностей профиля *Sm* и силы резания *Pz*, рассчитанных по модели и полученных опытным путем) степенных моделей не превышает 16,6 %, что удовлетворяет требованиям практики механической обработки. Сравнение полученных математических моделей путем оценки погрешности обнаружило предпочтение моделей степенного вида.

На основе разработанных моделей для определения среднего арифметического отклонения профиля *Ra* и среднего шага неровностей профиля *Sm*, исходя из режимов и условий обработки, решена и обратная задача. Выведены математические зависимости для определения величины подачи *S* для обеспечения шероховатости обработанной поверхности (по параметру *Ra* или *Sm*), заданной техническими условиями на изготовление детали.

Для удобства использования моделей, упрощения вычислений при технологической подготовке производства и для задач адаптивного управления автоматизированным оборудованием с ЧПУ они выражены в виде расчетных формул, которые приведены в табл. 1 и 2.

Зависимости рекомендуются для режимов и условий обработки, приведенных в табл. 3.

Таблица 1

Table 1

Расчетные формулы для ТПП и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой деталей из конструкционных углеродистых и легированных сталей

Calculation formulas for TPP and adaptive control of turning and milling of parts made of carbon and alloyed steels

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 130,7 s^{1,18} v^{-0,09} \lambda^{0,02} \mathrm{HV}^{-0,36}$	(2)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Ra}{130,7 v^{-0,09} \lambda^{0,02} \mathrm{HV}^{-0,36}} \right)^{1/18}$	(3)
	Sm, мм	$Sm = 0,57 s^{0,94} v^{0,01} \lambda^{-0,06} \mathrm{HV}^{0,15}$	(4)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{0,57 v^{0,01} \lambda^{-0,06} \mathrm{HV}^{0,15}} \right)^{1/0,94}$	(5)
	Pz, Н	$Pz = 16501,7 s^{0,72} v^{-0,17} \lambda^{0,006} \mathrm{HV}^{0,12}$	(6)
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 4520,9 s^{1,08} v^{-0,32} \lambda^{0,31} \mathrm{HV}^{-1}$	(7)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Ra}{4520,9 v^{-0,32} \lambda^{0,31} \mathrm{HV}^{-1}} \right)^{1/1,08}$	(8)
	Sm, мм	$Sm = 1,65 s^{0,87} v^{-0,13} \lambda^{0,11} \mathrm{HV}^{-0,03}$	(9)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{1,65 v^{-0,13} \lambda^{0,11} \mathrm{HV}^{-0,03}} \right)^{1/0,87}$	(10)
	Pz, Н	$Pz = 1227438,3 s^{0,22} v^{-1,25} \lambda^{0,02} \mathrm{HV}^{-0,004}$	(11)
Фрезерование			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 7,13 Sz^{0,8} v^{-0,21} \lambda^{0,39} \mathrm{HV}^{-0,06}$	(12)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{7,13 v^{-0,21} \lambda^{0,39} \mathrm{HV}^{-0,06}} \right)^{\frac{1}{0,8}}$	(13)
	Sm, мм	$Sm = 5,96 Sz^{0,85} v^{0,13} \lambda^{-0,26} \mathrm{HV}^{-0,14}$	(14)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{5,96 v^{0,13} \lambda^{-0,26} \mathrm{HV}^{-0,14}} \right)^{1/0,85}$	(15)
	Pz, Н	$Pz = 4316,8 Sz^{0,2} v^{-0,13} \lambda^{0,04} \mathrm{HV}^{0,1}$	(16)

Окончание табл. 1
End table 1

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Чистовое	*Ra*, мкм	$Ra = 11,44Sz^{0,84}v^{-0,1}\lambda^{0,09}\mathrm{HV}^{-0,02}$	(17)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{11,44v^{-0,1}\lambda^{0,09}\mathrm{HV}^{-0,02}}\right)^{1/0,84}$	(18)
	Sm, мм	$Sm = 0,27Sz^{0,9}v^{0,04}\lambda^{-0,29}\mathrm{HV}^{0,52}$	(19)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{0,27v^{0,04}\lambda^{-0,29}\mathrm{HV}^{0,52}}\right)^{1/0,9}$	(20)
	Pz, Н	$Pz = 10658,6Sz^{0,1}v^{-0,45}\lambda^{0,19}\mathrm{HV}^{0,02}$	(21)

Таблица 2
Table 2

Расчетные формулы для ТПП и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой деталей из коррозионно-стойких сталей

Calculation formulas for TPP and adaptive control of turning and milling of parts made of stainless steels

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	*Ra*, мкм	$Ra = 24,9s^{1,15}v^{0,15}\lambda^{-0,07}\mathrm{HV}^{-0,21}$	(22)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Ra}{24,9v^{0,15}\lambda^{-0,07}\mathrm{HV}^{-0,21}}\right)^{1/1,15}$	(23)
	Sm, мм	$Sm = 0,76s^{0,88}v^{-0,01}\lambda^{-0,03}\mathrm{HV}^{0,1}$	(24)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{0,76v^{-0,01}\lambda^{-0,03}\mathrm{HV}^{0,1}}\right)^{\frac{1}{0,88}}$	(25)
	Pz, Н	$Pz = 134662,5s^{0,72}v^{-0,57}\lambda^{0,02}\mathrm{HV}^{0,04}$	(26)
Чистовое	*Ra*, мкм	$Ra = 20,4s^{1,4}v^{-0,02}\lambda^{0,01}\mathrm{HV}^{-0,04}$	(27)
	S_o, мм/об	$So = \left(\frac{Ra}{20,4v^{-0,02}\lambda^{0,01}\mathrm{HV}^{-0,04}}\right)^{\frac{1}{1,4}}$	(28)
	Sm, мм	$Sm = 1,16s^{0,91}v^{-0,04}\lambda^{0,1}\mathrm{HV}^{-0,04}$	(29)

Окончание табл. 2
End table 2

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{1{,}16 v^{-0{,}04} \lambda^{0{,}1} HV^{-0{,}04}} \right)^{1/0{,}91}$	(30)
	Pz, Н	$Pz = 1884646{,}9 s^{0{,}14} v^{-1{,}13} \lambda^{-0{,}01} HV^{-0{,}24}$	(31)
Фрезерование			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 5{,}5 Sz^{0{,}51} v^{-0{,}05} \lambda^{0{,}53} HV^{-0{,}43}$	(32)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{5{,}5 v^{-0{,}05} \lambda^{0{,}53} HV^{-0{,}43}} \right)^{1/0{,}51}$	(33)
	Sm, мм	$Sm = 32{,}56 Sz^{1{,}04} v^{0{,}01} \lambda^{0{,}77} HV^{-1{,}01}$	(34)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{32{,}56 v^{0{,}01} \lambda^{0{,}77} HV^{-1{,}01}} \right)^{1/1{,}04}$	(35)
	Pz, Н	$Pz = 9891{,}1 Sz^{0{,}19} v^{-0{,}22} \lambda^{0{,}04} HV^{0{,}03}$	(36)
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 4{,}7 Sz^{0{,}72} v^{-0{,}02} \lambda^{0{,}18} HV^{-0{,}13}$	(37)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{4{,}7 v^{-0{,}02} \lambda^{0{,}18} HV^{-0{,}13}} \right)^{\frac{1}{0{,}72}}$	(38)
	Sm, мм	$Sm = 14{,}72 Sz^{1{,}08} v^{-0{,}32} \lambda^{-0{,}17} HV^{0{,}12}$	(39)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{14{,}72 v^{-0{,}32} \lambda^{-0{,}17} HV^{0{,}12}} \right)^{1/1{,}08}$	(40)
	Pz, Н	$Pz = 36536{,}2 Sz^{0{,}22} v^{-0{,}55} \lambda^{0{,}04} HV^{0{,}03}$	(41)

Таблица 3
Table 3

Режимы и условия механической обработки, для которых разработаны расчетные формулы
Modes and conditions of machining which for the calculation formulas are developed

Вид обработки (глубина резания)	Фактор	Диапазон	Фактор	Диапазон	HV обработка материала
	Точение		Фрезерование		
Предварительная (t = 2 мм)	S_o, мм/об	0,3…0,5	Sz, мм/зуб	0,09…0,15	Сталь 40Х НВ 230-370 Сталь 20Х13 НВ 190-300
	v, м/мин	60…120	v, м/мин	60…120	
	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	11…51	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	37,1…55,3	
Чистовая (t = 0,5 мм)	S_o, мм/об	0,08…0,25	Sz, мм/зуб	0,06…0,12	
	v, м/мин	100…200	v, м/мин	100…200	
	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	11…51	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	37,1…55,3	

Результаты и их обсуждение

Анализ, выполненный с позиций температурно-деформационных основ процесса резания [18], позволил сформулировать следующие закономерности изменения шероховатости обработанной поверхности и силы резания, т. е. нагрузки на режущий инструмент.

Значения коэффициентов регрессии математических моделей для определения величины среднего арифметического отклонения профиля *Ra* для предварительного и чистового точения и фрезерования демонстрируют, что наибольшее влияние на формирование шероховатости обработанной поверхности оказывает величина подачи (см. формулы (2), (7), (12), (17), (22), (27), (32), (37)). С увеличением подачи шероховатость растет, что согласуется с представлениями о геометрических факторах формирования микронеровностей обработанной поверхности [12, 19].

При точении изменение скорости резания имеет неодинаковое влияние в зависимости от вида обрабатываемого материала. Так, при точении типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей – стали 40Х с увеличением скорости резания имеет место снижение шероховатости обработанной поверхности (коэффициенты регрессии –0,09 и –0,32 для предварительного и чистового точения соответственно в формулах (2), (7)). Данная тенденция объясняется увеличением скорости деформации и температуры в зоне резания и соответственно облегчением перемещения металла в контактной зоне и улучшением условий формирования обработанной поверхности. При этом следует отметить, что для чистового точения влияние скорости резания почти в четыре раза выше, чем для предварительного (см. значения коэффициентов регрессии). Это объясняется увеличением влияния теплофизических аспектов формирования обработанной поверхности при небольших глубинах резания (t = 0,5мм) по сравнению с превалированием геометрических факторов при предварительной обработке (t = 2 мм).

Изменение теплопроводности инструментального материала также имеет неодинаковое влияние в зависимости от вида обрабатываемого материала на токарных операциях. При точении типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей – стали 40Х с увеличением теплопроводности инструментального материала величина *Ra* растет (см. формулы (2), (7)). Данное явление объясняется увеличением интенсивности стока тепла из зоны резания при увеличении теплопроводности инструмента. Вследствие этого согласно температурно-деформационным закономерностям контактного взаимодействия, описанным в работе [18], имеет место увеличение участка пластического контакта зоны контактных пластических деформаций (КПД), увеличение сил резания и ухудшение условий формирования обработанной поверхности. При этом аналогично фактору скорости резания при чистовом точении влияние теплопроводности инструментального материала почти в 16 раза выше, чем для предварительного точения.

С увеличением твердости обрабатываемого материала при точении и фрезеровании значение среднего арифметического отклонения профиля снижается (см. формулы (2), (7), (22), (27)), что согласуется с имеющимися представлениями об обработке резанием ([12, 13, 18, 20] и др.) и объясняется стабилизацией линии раздела, уменьшением зоны очага разрушения при отделении стружки и соответствующим изменением характера процессов контактного взаимодействия в зоне резания. При этом из полученных математических моделей для токарной обработки следует, что влияние твердости обрабатываемого материала на значение шероховатости обработанной поверхности является вторым по величине после влияния подачи.

Изменение скорости резания и теплопроводности инструментального материала при точении коррозионно-стойких сталей оказывает влияние на величину среднего арифметического отклонения профиля *Ra*, обусловленное особенностями обработки резанием данных материалов.

При точении стали 20Х13 на предварительных режимах при увеличении скорости резания имеет место увеличение шероховатости обработанной поверхности (коэффициент регрессии +0,15 в формуле (22)). Кроме этого увеличение теплопроводности инструментального материала приводит к уменьшению величины параметра *Ra* (коэффициент регрессии –0,07 в формуле (22)).

Данные явления объясняются теплофизическими особенностями обработки резанием коррозионно-стойких сталей [18, 21]. Во-первых, лезвийная обработка данных материалов характеризуется высокочастотной цикличностью, т.е. неустойчивостью процесса стружкообразования и контактного пластического деформирования в широком диапазоне скоростей, что негативно сказывается на формировании микрогеометрии обработанной поверхности. Изменение факторов процесса точения, вызывающее рост температуры в зоне резания, способствует росту частоты цикличности. Во-вторых, в противоположность конструкционным углеродистым и легированным сталям с ростом температуры теплопроводность коррозионно-стойких сталей растет. В связи с этим при росте температуры резания сток теплоты из зоны КПД в обрабатываемый материал интенсифицируется, что способствует увеличению участка пластического контакта зоны КПД и ухудшению условий формирования обработанной поверхности.

По причине описанных особенностей при предварительной токарной обработке, когда имеют место большие сечения среза, увеличение скорости резания способствует существенному увеличению объема тепловыделения в зоне резания и развитию описанных выше механизмов. Увеличение теплопроводности инструментального материала содействует более интенсивному отводу тепла в тело инструмента и обратному влиянию на развитие описанных выше процессов по сравнению со скоростью резания. Рост тепловыделения при увеличении скорости резания имеет большее влияние, чем изменение теплопроводности инструмента (см. значения коэффициентов регрессии в формуле (22)). Данные аспекты обусловливают величины и знаки коэффициентов регрессии для факторов скорости резания и теплопроводности инструментального материала в формуле (22).

При точении стали 20Х13 на чистовых режимах в связи с относительно небольшим сечением среза изменение мощности источника тепла оказывает меньшее влияние. Поэтому при увеличении скорости резания уменьшается шероховатость обработанной поверхности (коэффициент регрессии –0,02 в формуле (27)). При увеличении теплопроводности инструментального материала происходит незначительное увеличение величины параметра *Ra* (коэффициент регрессии 0,01 в формуле (27)). Следует отметить, что при чистовом точении коррозионно-стойкой стали изменение факторов скорости резания и теплопроводности инструмента оказывает незначительное влияние.

Влияние факторов скорости резания, теплопроводности инструментального и твердости обрабатываемого материала на величину среднего арифметического отклонения профиля *Ra* при фрезерной обработке характеризуется их особенностями.

В связи с кратковременностью нахождения зуба фрезы в процессе повторяющихся актов отделения стружки, по сравнению с установившимся резанием при однолезвийной (токарной) обработке, влияние высокочастотной цикличности стружкообразования при обработке коррозионно-стойких сталей при фрезеровании оказывает меньшее влияние на качество поверхности, чем при точении. Увеличение скорости резания при предварительном и чистовом фрезеровании конструкционных углеродистых и легированных сталей и коррозионно-стойких сталей способствует снижению величины *Ra* (см. формулы (12), (17), (32), (37)). Указанное влияние обусловлено увеличением скорости деформации и температуры в зоне резания и соответственно облегчением перемещения металла в контактной зоне и улучшением условий формирования обработанной поверхности.

При многолезвийной обработке с увеличением теплопроводности инструментального материала величина среднего арифметического отклонения профиля растет (см. формулы (12), (17), (32), (37)). Как описано ранее, подобное влияние теплопроводности инструментального материала связано с увеличением интенсивности стока тепла из зоны резания при увеличении теплопроводности инструмента. В результате этого согласно температурно-деформационным закономерностям контактного взаимодействия, описанным в [18], имеет место увеличение участка пластического контакта зоны КПД, увеличение сил резания и ухудшение условий формирования обработанной поверхности. Анализ математических моделей для определения величины *Ra* при фрезерной обработке говорит о том, что теплопроводность инструментального

материала оказывает второе по значимости влияние после величины подачи.

Следует отметить, что при чистовой многолезвийной обработке влияние факторов скорости резания, теплопроводности инструментального и твердости обрабатываемого материала на величину среднего арифметического отклонения профиля почти в 2,5 раза ниже, чем при предварительном фрезеровании (см. значения коэффициентов регрессии в формулах (12), (17), (32), (37)). Это объясняется меньшим сечением среза, приходящегося на один зуб фрезы, при чистовой обработке, и, следовательно, уменьшением роли факторов, определяющих уровень напряжений в зоне резания (твердость), интенсивность тепловыделения (скорость резания) и характер теплораспределения (теплопроводность инструмента).

Относительно шаговых параметров шероховатости, к которым относится средний шаг неровностей профиля *Sm*, при лезвийной обработке они определяются в основном подачей [12]. Этим объясняется основное влияние фактора подачи по сравнению с меньшим влиянием остальных факторов в полученных математических моделях для определения величины параметра *Sm* для точения и фрезерования конструкционных углеродистых и легированных и коррозионностойких сталей (см. формулы (4), (9), (14), (19), (24), (29), (34), (39)).

Разработанные математические модели для определения величины силы резания *Pz* при точении и фрезеровании отражают следующие особенности процессов обработки.

С увеличением подачи растет толщина срезаемого слоя, уровень напряжений в зоне деформирования, размеры участков пластического и полного контактов зоны КПД и соответственно сила резания (см. формулы (6), (11), (16), (21), (26), (31), (36), (41)). При этом при предварительной обработке подача оказывает наибольшее влияние на значение *Pz* по сравнению с остальными приведенными факторами (коэффициенты регрессии +0,72; +0,72; +0,19; +0,2 для предварительного точения и фрезерования сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (6), (16), (26), (36)). Это объясняется превалированием влияния роста площади срезаемого слоя по сравнению с влиянием других факторов, например, скорости резания. Лишь при предварительном фрезеровании стали 40Х величины коэффициентов регрессии для факторов подачи и скорости резания близки.

Увеличение скорости резания способствует уменьшению силы резания (см. формулы (6), (11), (16), (21), (26), (31), (36), (41)). Указанное влияние на примере токарной обработки объясняется ростом интенсивности тепловыделения, снижением уровня контактных касательных напряжений в зоне КПД, увеличением угла сдвига β, уменьшением размеров участков пластического и полного контактов [18]. Следует отметить, что при чистовой токарной и фрезерной обработке скорость, в свою очередь, оказывает наибольшее влияние среди остальных рассмотренных факторов на формирование величины силы резания (коэффициенты регрессии: –1,13; –1,25; –0,55; –0,45 для чистового точения и фрезерования сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (11), (21), (31), (41)). Это объясняется превалированием теплофизических процессов в зонах стружкообразования и КПД при малых глубинах резания над влиянием площади срезаемого слоя.

Изменение теплопроводности в исследованном диапазоне величин оказывает незначительное влияние на силу резания. В основном с увеличением теплопроводности инструмента сила резания растет (см. формулы (6), (11), (16), (21), (26), (31), (36), (41)), что объясняется интенсификацией стока тепла из зоны резания и соответствующим уменьшением угла сдвига β и увеличением размеров участков пластического и полного контактов [18].

Согласно [18] увеличение механической прочности обрабатываемого материала оказывает взаимно противоположное влияние на силу резания. С одной стороны, увеличение прочности приводит к росту сопротивления деформированию в зонах стружкообразования и КПД, с другой – это способствует росту интенсивности тепловыделения и соответствующему увеличению угла сдвига β и уменьшению размеров участков пластического и полного контакта. Превалирование того или иного механизма зависит от режимов и условий обработки. Подтверждение данного положения имеет место и в настоящем исследовании в полученных зависимостях.

При предварительной токарной обработке увеличение твердости обрабатываемого матери-

ала способствует росту силы резания (коэффициенты регрессии с положительным знаком для предварительного точения сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (6), (16)) за счет относительно большей площади срезаемого слоя и роста касательных и нормальных напряжений в зоне резания. При чистовой токарной обработке имеет место обратная тенденция – увеличение твердости материала детали вызывает снижение силы резания (коэффициенты регрессии с отрицательным знаком для чистового точения сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (11), (21)), что объясняется при меньшей площади среза превалирующим влиянием роста интенсивности тепловыделения и соответствующего уменьшения размеров участков пластического и полного контактов.

При прерывистом резании в связи с кратковременностью нахождения зуба фрезы в процессе повторяющихся актов отделения стружки, по сравнению с установившимся резанием, рост сопротивления деформированию имеет превалирующее значение над ростом интенсивности тепловыделения, поэтому при фрезеровании увеличение твердости обрабатываемого материала способствует некоторому росту силы резания (коэффициенты регрессии с положительным знаком в формулах (26), (31), (36), (41)).

Выводы

Таким образом, разработанные расчетные формулы позволяют определять значения среднего арифметического отклонения профиля *Ra* и среднего шага неровностей профиля *Sm* обработанной поверхности, подачи *S* и силы резания *Pz* при точении и фрезеровании. Они предназначены для технологической подготовки производства и для адаптивного управления автоматизированным оборудованием с ЧПУ в ЦПС для механической обработки. Представленные математические модели описывают закономерности формирования функциональных и выходных параметров обработки резанием. Анализ разработанных математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления процессом резания на современном автоматизированном оборудовании с ЧПУ обнаружил закономерности формирования микрогеометрии обработанной поверхности и силы резания, т.е. нагрузки на инструмент, с позиции теории резания и температурно-деформационных закономерностей высокоскоростного пластического деформирования.

Список литературы

1. *Chang P.* Targeting “Industrie 4.0” // The Challenger. – 2017. – Vol. 9, iss. 33. – P. 2–3.

2. *Ingemansson A.R.* The development of informational-executive cyber-physical systems in materials production and metalworking // Innovative Technologies in Engineering: From Design to Competitive Product. – 2019. – Vol. 973. – P. 200–205. – DOI: 10.1007/978-3-0357-3267-2.

3. *Ingemansson A.R.* Characteristics, composition, mechanism function and modern aspects of implementation of digital production systems in mechanical engineering industry // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – Cham: Springer, 2020. – Vol. 2. – P. 1167–1174. – DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1.

4. *Старков В.К.* Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0.

5. Повышение эффективности процессов механообработки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин, Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 184 с. – ISBN 978-5-6040281-1-7.

6. Condition monitoring of CNC machining using adaptive control / B.S. Prasad, D.S. Prasad, A. Sandeep, G. Veeraiah // International Journal of Automation and Computing. – 2013. – Vol. 10. – P. 202–209. – DOI: 10.1007/s11633-013-0713-1.

7. Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process / F. Cus, U. Zuperl, E. Kiker, M. Milfelner // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Vol. 17, iss. 1–2. – P. 237–240.

8. *Zuperl U., Cus F., Milfelner M.* Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 164–165. – P. 1472–1478. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02/143.

9. *Chang P.* AI case study // Breakthrough. – 2018. – Vol. 10, iss. 38. – P. 12–15.

10. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. – ISBN 978-5-907104-23-5.

11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 942 с. – ISBN 5-94275-013-0.

12. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с. – ISBN 5-217-03108-5.

13. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров, Н.Л. Земина, О.А. Пленина, Ю.Я. Прохоров, А.Н. Соломахин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.

14. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. – South Korea: Korloy Publ., 2017. – 1060 p.

15. Big Daishowa. High precision toolholders: catalogue. – Japan: Big Daishowa Seiki Ltd., 2016. – 324 p.

16. Sandvik Coromant machining work manual: guide. – Sweden: Elanders Publ., 2010. – 803 p.

17. *Ингеманссон А.Р., Бондарев А.А.* Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 97–105. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-97-105.

18. *Талантов Н.В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с. – ISBN 5-217-01857-7.

19. *Kalpakjian S.*, *Schmid S.R.* Manufacturing engineering and technology. – New York: Prentice Hall, 2010. – 1180 p. – ISBN 9810681445.

20. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

21. *Липатов А.А.* Закономерности процесса резания высоколегированных сталей и пути повышения работоспособности твердосплавного инструмента: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01. – Волгоград, 1987. – 256 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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 27–40
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Development of Mathematical Models for Technological Preparation of Production and Adaptive Control for Turning and Milling in Digital Production Systems

Alexander Ingemansson *

JSC «Federal Scientific and Production Center «Titan-Barricady», Lenin av., w/n, Volgograd, 400071, Russian Federation

https://orcid.org/0000-0002-7963-393X, aleing@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 22 November 2019
Revised: 28 December 2019
Accepted: 30 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Technological preparation of production
Machining by cutting
Adaptive control
Mathematical models
Digital production systems

ABSTRACT

Introduction. The development of science-intensive solutions for technological providing of stabile output of machined surface quality and working performance of cutting instrument is up-to-date direction of technological process of machining efficiency increase. This problem poses special value for production systems, which use automated equipment; in particular, for digital production systems (DPS), i.e. it is connected with the implementation of "industrie 4.0" concept in industry. Instability of cutting process appears in fluctuation of thermo-load characteristics of chip-forming processes and contact interaction and promotes instability of quality of machined surface and working performance of cutting instrument. Adaptive control allows to ensure output parameters of cutting process stability while the fluctuation of condition of technological system. On the basis of modern CNC equipment abilities the adaptive control of cutting modes suggested in aim to increase the efficiency of technological process of machining. **The purpose of the work** is the development and justification of mathematical models linking the influence of modes and parameters of machining with the functional and output parameters of turning and milling to be used in technological preparation of production (TPP) and adaptive control of cutting process in DPS. **The research methods** are: planning of multilevel full-factor experiments due to the analysis of most widely used construction and tool materials, modes and conditions of machining in turning and milling on CNC machine tools, statistic treatment of experiments results and regression analysis, analysis of obtained mathematical models from the points of theory and physical principles of cutting process. **The results and discussion.** Based on the carried out experimental investigations, development of mathematical models and analysis of obtained results the calculation formulas for definition of arithmetic mean value Ra and mean roughness spacing Sm of machined surface, feed and cutting force in turning and milling are obtained. Listed mathematical models describe patterns of formation of functional and output parameters of machining by cutting and intended for TPP and for adaptive control of modern automated CNC equipment in DPS for machining. Analysis of developed mathematical models found out patterns of formation of machined surface texture and of cutting forces, i.e. tool load, from points of theory of cutting process and temperature-deformational patterns of high-speed plastic deformation.

For citation: *Ingemansson A.R.* Development of Mathematical Models for Technological Preparation of Production and Adaptive Control for Turning and Milling in Digital Production Systems. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 27–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40. (In Russian).

References

1. Chang P. Targeting "Industrie 4.0". *The Challenger*, 2017, vol. 9, iss. 33, pp. 2–3.

2. Ingemansson A.R. The development of informational-executive cyber-physical systems in materials production and metalworking. *Innovative Technologies in Engineering: From Design to Competitive Product*, 2019, vol. 973, pp. 200–205. DOI: 10.1007/978-3-0357-3267-2.

3. Ingemansson A.R. Characteristics, composition, mechanism function and modern aspects of implementation of digital production systems in mechanical engineering industry. *Proceedings of the 5th International Conference*

*** Corresponding author**
Ingemansson Alexander R., Ph.D. (Engineering), Head
of Technological department
JSC «Federal Scientific and Production Center «Titan-Barricady»
Lenin av., w/n,
400071, Volgograd, Russian Federation
Tel.: 8 (8442) 74-90-74, **e-mail:** aleing@yandex.ru

on Industrial Engineering (ICIE 2019). Cham, Springer, 2020, vol. 2, pp. 1167–1174. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1.

4. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p. ISBN 978-5-94275-460-0.

5. Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Shatagin D.A., Kuz'mishina A.M. *Povyshenie effektivnosti protsessov mekhanoobrabotki na osnove podkhodov iskusstvennogo intellekta i nelineinoi dinamiki* [Increase of efficiency of machining processes on basis of approaches of artificial intellect and nonlinear dynamics]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 184 p. ISBN 978-5-6040281-1-7.

6. Prasad B.S., Prasad D.S., Sandeep A., Veeraiah G. Condition monitoring of CNC machining using adaptive control. *International Journal of Automation and Computing*, 2013, vol. 10, pp. 202–209. DOI: 10.1007/s11633-013-0713-1.

7. Cus F., Zuperl U., Kiker E., Milfelner M. Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, vol. 17, iss. 1–2, pp. 237–240.

8. Zuperl U., Cus F., Milfelner M. Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling. *Journal of Materials Processing Technology,* 2005, vol. 164–165, pp. 1472–1478. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02/143.

9. Chang P. AI case study. *Breakthrough*, 2018, vol. 10, iss. 38, pp. 12–15.

10. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [Reference book of the technologist]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p. ISBN 978-5-907104-23-5.

11. Dal'skii A.M., ed. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya.* V 2 t. T. 2 [Reference book of the technologist. In 2 vol. Vol. 2]. 5th ed. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001. 942 p. ISBN 5-94275-013-0.

12. Suslov A.G., Dal'skii A.M. *Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Science basis of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 684 p. ISBN 5-217-03108-5.

13. Gurevich Ya.L., Gorokhov M.V., Zakharov V.I., Zemina N.L., Plenina O.A., Prokhorov Yu.Ya., Solomakhin A.N. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov:* spravochnik [Cutting modes for hard-machined materials: reference book]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 240 p.

14. *Korloy. Metal cutting tools*: catalogue. South Korea, Korloy Publ., 2017. 1060 p.

15. *Big Daishowa. High precision toolholders*: catalogue. Japan, Big Daishowa Seiki Ltd., 2016, 324 p.

16. *Sandvik Coromant machining work manual*: guide. Sweden, Elanders Publ., 2010. 803 p.

17. *Ingemansson A.R., Bondarev A.A.* Definition of thermal conductivity of cemented carbide cutting tools with multilayer wear-resistant coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 97–105. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-97-105. (In Russian).

18. Talantov N.V. *Fizicheskie osnovy protsessa rezaniya, iznashivaniya i razrusheniya instrumenta* [Physical fundamentals of cutting, wear and destruction of the tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 240 p. ISBN 5-217-01857-7.

19. Kalpakjian S., Schmid S.R. *Manufacturing engineering and technology.* New York, Prentice Hall, 2010. 1180 p. ISBN 9810681445.

20. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

21. Lipatov A.A. *Zakonomernosti protsessa rezaniya vysokolegirovannykh stalei i puti povysheniya rabotosposobnosti tverdosplavnogo instrumenta.* Diss. kand. tekhn. nauk [Highly-alloyed steels cutting process patterns and directions to increase efficiency of cemented carbide tools. PhD eng. sci. diss.]. Volgograd, 1987. 256 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). 2020 Том 22 № 1 с. 41–53
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-41-53

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Растяжные титановые сетки на основе деформирующего резания

Николай Зубков *

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

https://orcid.org/0000-0003-3757-1299, zoubkovn@bmstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.044

История статьи:
Поступила: 27 декабря 2019
Рецензирование: 20 января 2020
Принята к печати: 14 февраля 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Растяжные сетки
Деформирующее резание
Герниопластика
Фильтрация
Фторопласт
Титан

Финансирование
Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (Грант № 9.5617.2017 / ВУ).

Благодарности
Автор выражает благодарность С.Ю. Коровушкину за помощь в проведении и обработке результатов экспериментов.

АННОТАЦИЯ

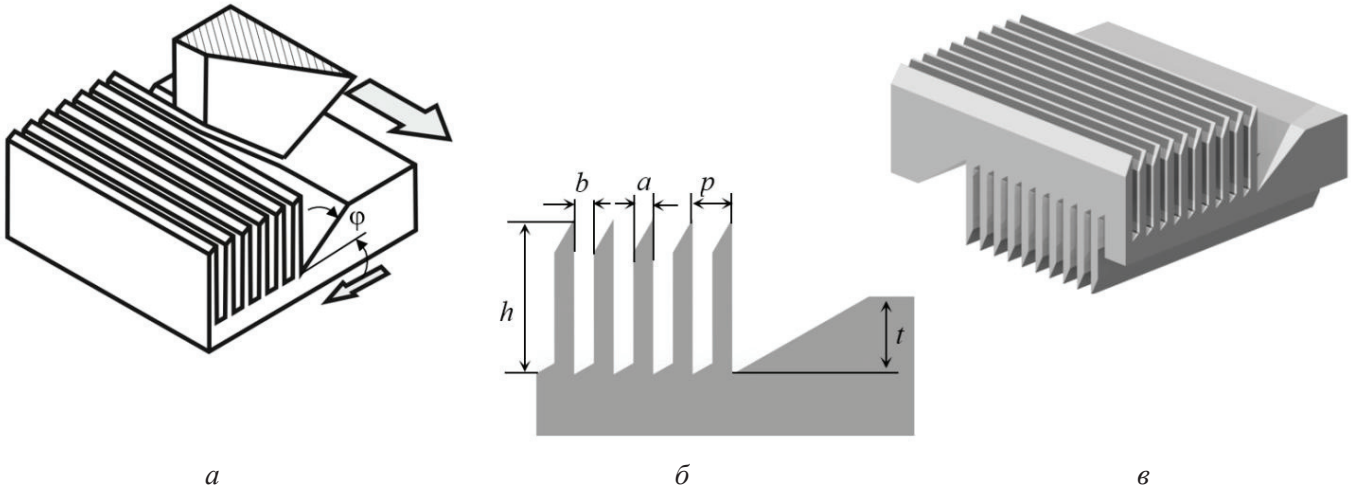
Введение. Одной из областей использования деформирующего резания (ДР) является получение сеток из тонколистовых материалов. Принцип их получения состоит в двустороннем оребрении листа во взаимно перпендикулярных направлениях с глубиной ДР более половины толщины листа. Существенным недостатком таких сеток является малая величина живого сечения (отношение суммарной площади отверстий к площади сетки). Одной из перспективных областей использования сеток, получаемых ДР, является их использование в герниопластике в качестве титановых имплантатов для лечения грыж и армирования костных и мягких тканей. Для имплантатов необходимо живое сечение сетки более 60 %, высокая податливость пластическим деформациям и большая удельная площадь поверхности для удержания прорастающих в имплантат тканей. В статье метод ДР рассматривается как альтернатива существующим титановым плетеным сеткам-имплантатам, имеющим крайне высокую стоимость. **Цель работы.** Изучение основных закономерностей получения методом ДР заготовок для сеток, особенностей их растягивания и анализ получаемых форм и размеров ячеек. **В работе исследовано** двустороннее оребрение тонколистовых заготовок из титана ВТ1-00 с несовпадающим направлением оребрения противоположных сторон листа в диапазоне углов скрещивания 1,3°…10° с варьированием угла подрезания заготовки и шага оребрения. Проведен анализ механики растяжения при получении ромбической, шестигранной и параллелограммной формы ячеек. **Результаты и обсуждение.** Установлен диапазон шагов оребрения и углов скрещивания, обеспечивающих стабильность процесса ДР и растягивания заготовки. На форму ячейки основное влияние оказывает длина связи ребер, полученных на противоположных сторонах листа. Увеличение длины связи при уменьшении угла скрещивания приводит к переходу формы ячейки от ромбической к шестигранной. Ячейка в виде параллелограмма свойственна ребрам противоположных сторон, имеющим отличия в изгибной прочности. **Выводы.** Метод деформирующего резания является альтернативным вариантом сквозного прорезания тонколистовых металлических и полимерных заготовок для их последующего растяжения с целью получения сеток. По сравнению с просечными и тканными сетками сетки, полученные на основе ДР, имеют большую площадь поверхности и повышенную способность к их пластическому деформированию. Обосновано получение форм ячеек ромбической, шестигранной и параллелограммной формы. Управление формой ячейки получаемой растяжной сетки осуществляется выбором угла направления ребер и шагом оребрения на противоположных сторонах заготовки. Наибольший размер ячейки и живое сечение сетки обеспечивают сетки с гексагональными ячейками при углах скрещивания направления ребер на противоположных сторонах заготовки менее 3°.

Для цитирования: *Зубков Н.Н.* Растяжные титановые сетки на основе деформирующего резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 41–53. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-41-53.

Введение

Метод деформирующего резания [1] основан на подрезании поверхностных слоев заготовки под углом подрезания φ и их последующем деформировании, при этом подрезанный слой остается прикрепленным к заготовке по своей узкой стороне и образует макрорельеф в виде оребрения (рис. 1, *а*). На поверхности заготовки формируется рельеф в виде чередующихся ребер, которые представляют собой стружку, не отделившуюся от основы по своей узкой стороне. Характерные параметры оребрения составляют (рис. 1, *б*): шаг оребрения p = 0,05...2,0 мм, высота ребер h до семи шагов оребрения для меди и до пяти шагов оребрения для пластичных

***Адрес для переписки**
Зубков Николай Николаевич, д.т.н., профессор,
Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
105005, г. Москва, Россия
Тел. раб.: +7-499-263-6486,
Тел. моб.: +7-916-607-7948, **e-mail**: zoubkovn@bmstu.ru



а *б* *в*

Рис. 1. Принцип деформирующего резания (*а*); параметры получаемого оребрения (*б*); схема сетки на основе двустороннего оребрения противоположных сторон листа (*в*)

Fig. 1. Concept of deformational cutting (*а*); fin parameters (*б*); concept of mesh based on the both side sheet finning (*в*)

сталей, ширина межреберного зазора b составляет от единиц микрометров до 1,0 мм, наклон ребер до 45°. Ограничением использования метода ДР являются показатели пластичности и твердости обрабатываемого материала. Оребрение устойчиво получается на материалах с относительным удлинением боле 18 % и твердостью менее HV 220.

В настоящее время метод ДР используется в различных областях производства. Основной является область интенсификации теплообмена, например, для оребрения труб теплообменных аппаратов [2], изготовления поверхностей кипения и капиллярных структур тепловых труб [3]. Метод ДР может быть также использован для создания электрических соединителей [4], упрочнения поверхностей [5], поверхностной закалки [6], нарезания резьб [7], формирования штырьковых теплообменных структур [8] и т. д.

Одной из областей использования деформирующего резания (ДР) является получение сеток из листовых материалов (рис. 1, *в*). Принцип их получения состоит в двустороннем оребрении листа во взаимно перпендикулярных направлениях с глубиной ДР более половины толщины листа [9]. На титане ВТ1-00 получены металлические сетки габаритом 400×400 мм с размером прямоугольных отверстий 20×40 мкм с количеством отверстий до 100 на квадратный миллиметр (рис. 2).

Рис. 2. Микросетка, полученная ДР из титанового листа ВТ1-00, толщиной 0,3 мм. Размер ячейки 20×40 мкм

Fig. 2. Micromesh obtained from titanium sheet VT1-00 with a thickness of 0.3 mm. Cell size 20×40 μm

Существенным недостатком таких сеток является малая величина живого сечения, под которым понимается отношение суммарной площади отверстий к площади сетки. Это обусловлено тем, что для ДР имеется ограничение по отношению толщины ребра a к шагу оребрения p (рис. 1, *б*). Для вертикального оребрения толщина ребра определяется углом подрезания φ и шагом оребрения $a = p\sin\varphi$, величина межреберного зазора $b = p(1 - \sin\varphi)$. Для меди, алюминия и титана, как более пластичных металлов, $a/p > 35$ %, для медных сплавов и коррозионностойких сталей $a/p > 0{,}6$ %. Следует учитывать,

что стабильность процесса ДР существенно зависит от соотношения *a/p*. Чем оно ниже, тем выше вероятность срыва отдельных ребер в виде стружки, что недопустимо для фильтрующих сеток. При получении сеток с перпендикулярным направлением оребрения противоположных сторон и вертикальными ребрами живое сечение Δ_{max} равно произведению предельных значений отношений ширины межреберного зазора к шагу для оребрений, получаемых на обеих сторонах листовой заготовки:

$$\Delta_{max} = \left(\frac{b_1}{p_1}\right)_{max}\left(\frac{b_2}{p_2}\right)_{max} = \left[1-\left(\frac{a_1}{p_1}\right)_{min}\right]\left[1-\left(\frac{a_2}{p_2}\right)_{min}\right],$$

где индексы 1 и 2 обозначают параметры оребрения противоположных сторон листа.

Таким образом, для более пластичных металлов предельное живое сечение Δ_{max} = 42 %, для сталей Δ_{max} = 16 %.

Одной из перспективных областей использования сеток, получаемых ДР, является их применение в герниопластике в качестве титановых имплантатов для лечения грыж и армирования мягких и костных тканей. Несомненно, сетки должны изготавливаться из биосовместимых материалов, одним из которых является титан [10, 11]. В настоящее время для герниопластики используются плетеные сетки из титановой микропроволоки диметром 40…60 мкм, так называемый «титановый шелк» [12, 13], который имеет очень высокую стоимость (около $300 за сетку размером 60×90 мм).

Для герниопластики живое сечение даже Δ = 42 % является крайне малым для прорастания тканей в структуру сетки. Вторым недостатком сеток с перпендикулярным направлением оребрения сторон листа является их высокая жесткость и низкая податливость пластическим деформациям. Для успешного приживления имплантата имеет значение не только высокая биосовместимость, но и относительная эластичность материала, используемого для длительной имплантации, а также высокая удельная площадь поверхности имплантата, необходимая для удержания прорастающих в имплантат тканей.

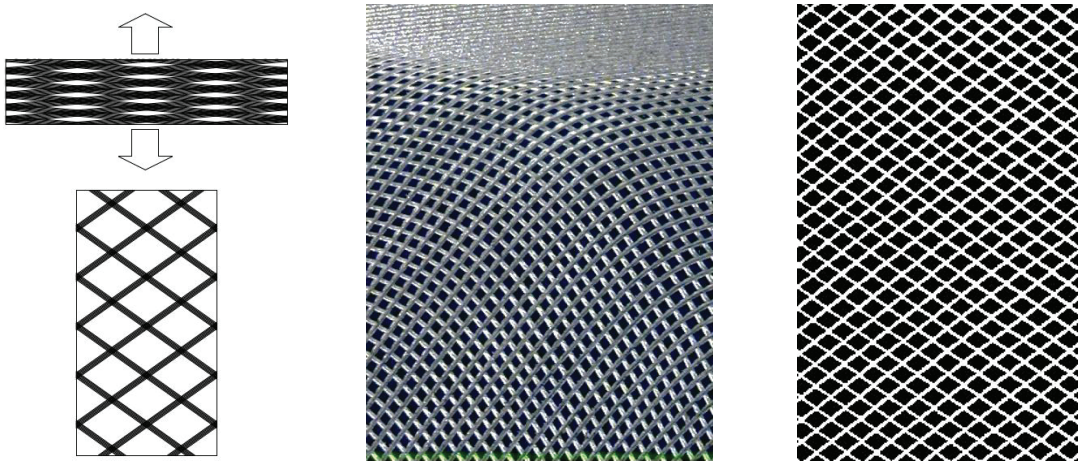
Обобщая сказанное выше, можно сформулировать следующие требования для титановых сеток, применяемых в герниопластике. Марка материала – ВТ1-00, толщина сетки 0,3…0,6 мм, размер ячейки 0,1…3,0 мм, живое сечение Δ > 60 %, габариты до 60×90 мм.

В статье рассматривается вариант получения растяжных сеток на основе заготовок, получаемых ДР и устраняющих вышеописанные недостатки. Это осуществляется за счет оребрения противоположных сторон листовой заготовки под углом не равным 90°, что дает соединение зазоров в виде вытянутых ромбов, которые затем растягивается, тем самым значительно увеличивают живое сечение сетки (рис. 3, *а*). Зона растяжения показана на рис. 3, *б*). Пример получаемой сетки приведен на рис. 3, *в*. Процесс растяжения сеток показан внизу web-страницы: http://defrez.ru/mikrosetky.htm.

Растяжная сетка представляет собой совокупность ребер, причем толщина ребра, в отличие от нерастяжных сеток, значительно меньше линейного размера ячейки.

Первоначальные эксперименты показали неопределенность формы получаемых ячеек при растяжении, поэтому возникла задача получения управляемых форм и размеров ячеек. Целью статьи является моделирование и экспериментальная проверка процесса растяжения сеток из тонколистовых двусторонне-оребренных заготовок, получаемых ДР.

Растяжные металлические сетки были известны и ранее. Они нашли использование в качестве фильтров, сит, элементов конструкций, армирования бетона, декоративных элементов, поглотителей энергии и др. [14–16]. По удельной прочности на растяжение такие сетки превосходят сплошной листовой материал [17]. Единственным способом их производства является сквозная просечка листа с последующим его растягиванием [18]. Механике растяжения просечных сеток в литературе уделено недостаточно внимания. В основном рассматривались особенности технологии растягивания заготовок из металлических и полимерных листовых материалов при получении сотовых конструкций [19, 20], которые неактуальны для растягивания заготовок, полученных ДР. В статье исследуются особенности растяжения сеток при альтернативном методе получения заготовок – двустороннего оребренния листов методом ДР.



а *б* *в*

Рис. 3. Схема растяжения сетки (*а*); зона растяжения на сетке из серебра (*б*), фотография титановой сетки после растяжения (*в*)

Fig. 3. Scheme of mesh stretching (*а*); the stretching zone of silver mesh (*б*); photo of the titanium mesh after stretching (*в*)

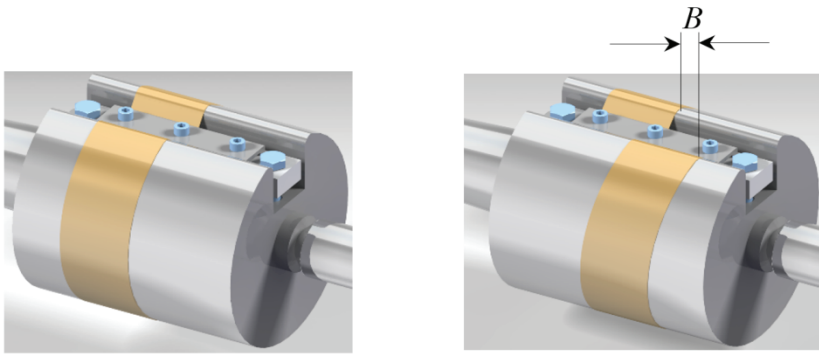
Методика исследований

Для получения заготовок для растяжения использовался токарно-винторезный станок 16Б16КА. Полоса из титана ВТ1-00 толщиной 0,3 мм и шириной 40 мм натягивалась на специально изготовленный барабан диаметром $D = 165$ мм, имеющий возможность закрепления концов полосы и ее натяжения (рис. 4).

Обработка велась со скоростью ДР $v = 100$ м/мин. Глубина резания $t = 0{,}2$ мм при обработке обеих сторон полосы. Величина шага ребер варьировалась от $p = 0{,}05 – 0{,}2$ мм. Угол скрещивания между направлениями оребрения противоположных сторон полосы изменяли в диапазоне от $\beta = 1{,}3°…10°$. Оребрение первой стороны проводилось параллельно боковой стороне ленты (рис. 4, *а*). Затем лента переворачивалась и ее концы закреплялись со смещением на величину B (рис. 4, *б*). Угол скрещивания управлялся расчетом по выражению $\beta = \operatorname{arctg}\left(B / (\pi D - c\right)$, где c – ширина натяжной планки.

Растяжение сеток проводилось на сконструированном приспособлении, показанном на рис. 5.

Форма ячеек сеток фиксировалась цифровой приставкой к микроскопу с измерением геометрических параметров сеток: длин ребер и угловых параметров.



а *б*

Рис. 4. Положение обрабатываемой ленты на барабане при оребрении ее противоположных сторон:

а – обработка первой стороны; *б* – обработка противоположной стороны

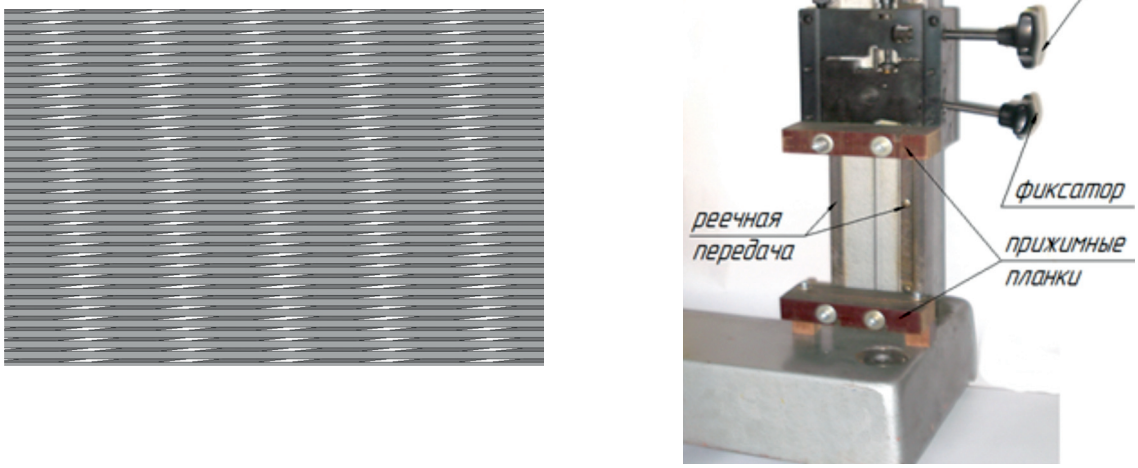
Fig. 4. Blank position on the drum for opposite sides finning:

а – for first side finning; *б* – for opposite side finning

Результаты

Определяющими параметрами растяжных сеток являются характерный размер, форма ячейки и живое сечение сетки.

До растяжения ширина ячейки $b_и$ равна межреберному зазору $b_и = S(1 – \sin\varphi)$. Из геометрических построений живое сечение заготовки для растяжения составит:



а *б*

Рис. 5. Структура сетки до растяжения (*а*) и устройство растягивания сеток (*б*)

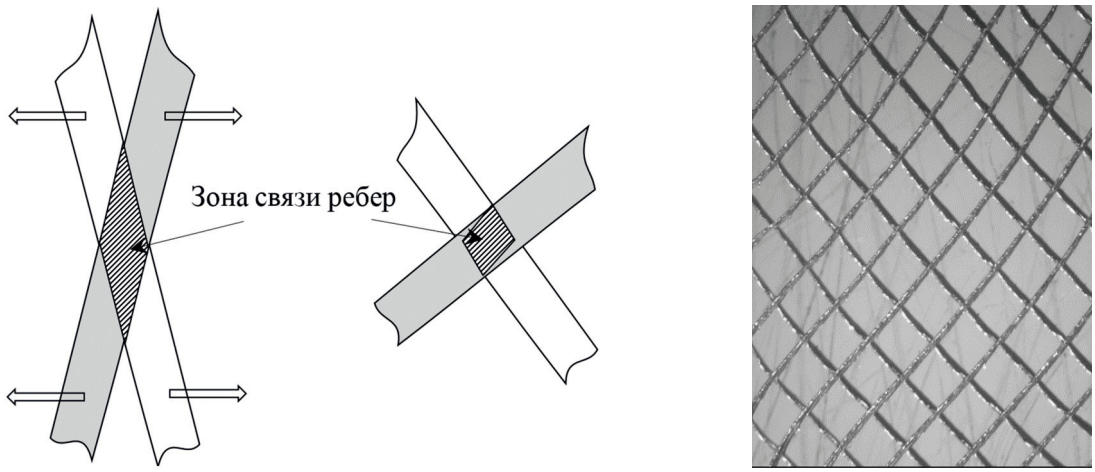
Fig. 5. Mesh structure before stretching (*а*) and device for mesh stretching (*б*)

$$\Delta_{и} = \frac{S_{отв}}{S_{яч}} =$$

$$= \frac{\left[p\left(1-\sin\beta\right)\right]^2\left[\mathrm{tg}\left(\beta/2\right)+\mathrm{tg}\left(90-\beta\right)\right]}{p^2\left[\mathrm{tg}\left(\beta/2\right)+\mathrm{tg}\left(90-\beta\right)\right]}.$$

Геометрические характеристики сеток после растяжения рассчитывались из допущения о равенстве периметров центральных линий ребер до и после растяжения.

Ромбические ячейки получаются при относительно больших углах скрещивания β. Формируется так называемый пластический шарнир в узлах пересечения ребер. При этом происходит частичный срез связи ребер вокруг шарнира. Ребра, сформированные на противоположных сторонах заготовки, не изгибаются (рис. 6). Рациональной степенью растяжения для сеток с ромбической ячейкой является получение ее квадратной формы, обеспечивающей максимальное



а *б*

Рис. 6. Формирование ромбических ячеек (*а*); сетка с ромбическими ячейками (*б*); угол скрещивания β = 4°; шаг оребрения *p* = 0,06 мм

Fig. 6. Formation of rhombic cells (*а*); mesh with rhombic cells (*б*); crossing angle β = 4°. Fin pitch *p* = 0.06 mm

значение живого сечения сетки. При растяжении с переходом через квадратную форму ячейки становятся снова ромбическими с уменьшением живого сечения.

Гексагональная форма ячеек получается при большой протяженности связи ребер, характерной для малых углов скрещивания β (рис. 7) и одинаковой изгибной прочности ребер противоположных сторон сетки. При растяжении, несмотря на частичное отделение ребер друг от друга, связь ребер остается неразрушенной на значительной длине. Оба ребра изгибаются и образуют гексагональную ячейку.

Ячейка параллелограммной формы образуется при различной прочности ребер противоположных сторон сетки-заготовки. Менее прочные ребра частично теряют связь с более прочными ребрами и изгибаются. Более прочные ребра остаются прямыми (рис. 8).

Прочность ребра на изгиб зависит от момента сопротивления сечения ребра изгибу, который равен

$$W_x = \frac{ha^2}{6} = \frac{tp^2 \sin\varphi}{6},$$

где h и a – высота и толщина ребра.

Из формулы видно, что управлять изгибной прочностью ребра можно варьированием глубины ДР (t), шагом ребер p и углом подрезания φ.

Помимо трех основных форм ячеек также возможны другие промежуточные варианты форм с непрямолинейными сторонами ячейки, образование которых обусловлено неравномерным изгибом ребер.

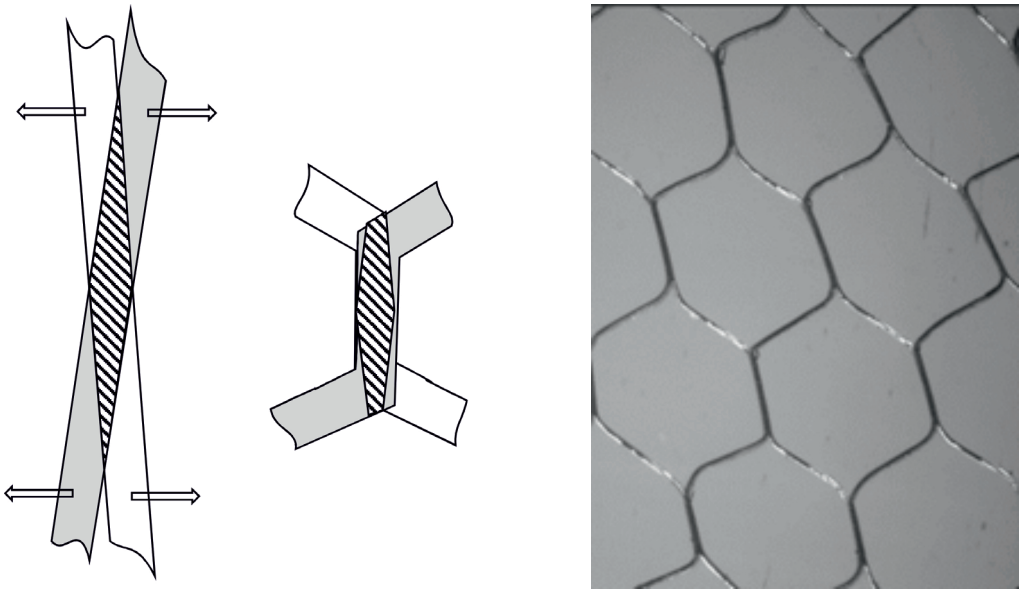
В таблице представлены результаты экспериментов по получению растяжных сеток при варьировании угла скрещивания и шага оребрения.

Графики размера ячейки и живого сечения сетки после растяжения в зависимости от угла скрещивания и шага ребер показаны на рис. 9 и 10.

Обсуждение результатов

При больших углах скрещивания и малых шагах оребрения растяжение сетки приводит к формированию ромбических ячеек с частным случаем образования квадрата. Сетки с квадратной ячейкой имеют наибольшее живое сечение при прочих равных условиях.

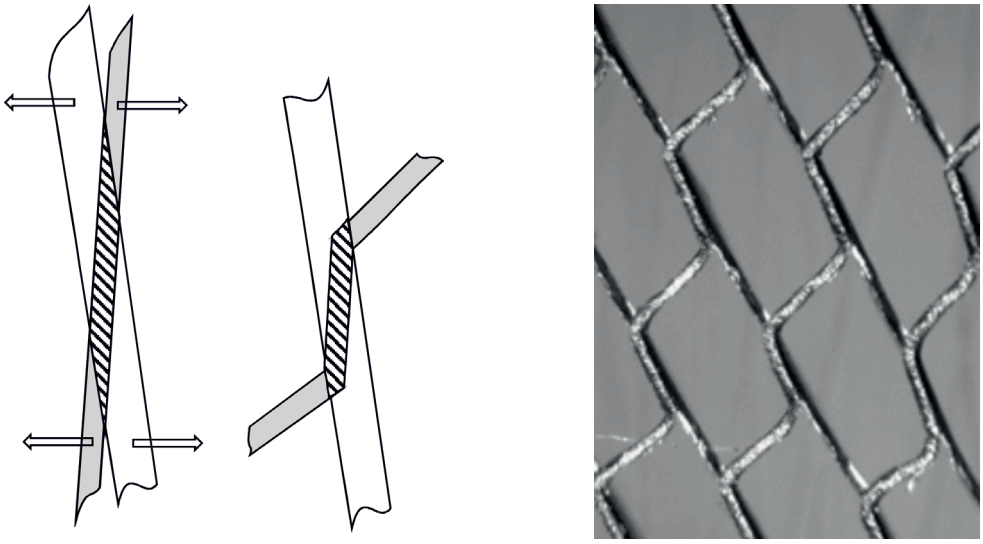
Уменьшение угла скрещивания β < 3° приводит к образованию гексагональных ячеек для всех исследованных шагов оребрения.



а *б*

Рис. 7. Формирование гексагональных ячеек (*а*); сетка с гексагональными ячейками (*б*); угол скрещивания β = 1,3°, шаг оребрения p = 0,06 мм

Fig. 7. Formation of hexagonal cells (*а*); mesh with hexagonal cells (*б*); the crossing angle β = 1,3°, fin pitch p = 0.06 mm



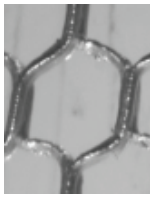
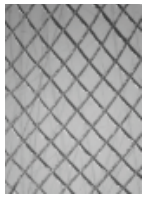
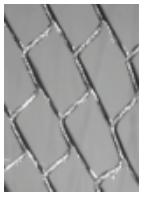
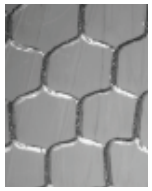
а *б*

Рис. 8. Формирование параллелограммных ячеек (*а*); сетка с параллелограммными ячейками (*б*); угол скрещивания β = 4°; шаг оребрения *p* = 0,08 мм для первой стороны и *p* = 0,1 мм для противоположной стороны

Fig. 8. The formation of parallelogram cells (*a*); mesh with parallelogram cells (*б*); the crossing angle β = 4°; the fin pitch *p* = 0.08 mm for the first side and *p* = 0.1 mm for the opposite side

Сетки после растяжения заготовок с различным углом скрещивания и шага ребер

Meshes after stretching with blank different fin cross angle and fin pitch

Угол скрещивания	*p* = 0,06 мм	*p* = 0,08 мм	*p* = 0,1 мм	*p* = 0,12 мм	*p* = 0,18 мм
β = 9° 1 мм					
β = 4° 5 мм					
β = 2,8° 5 мм					
β = 1,3° 5 мм					

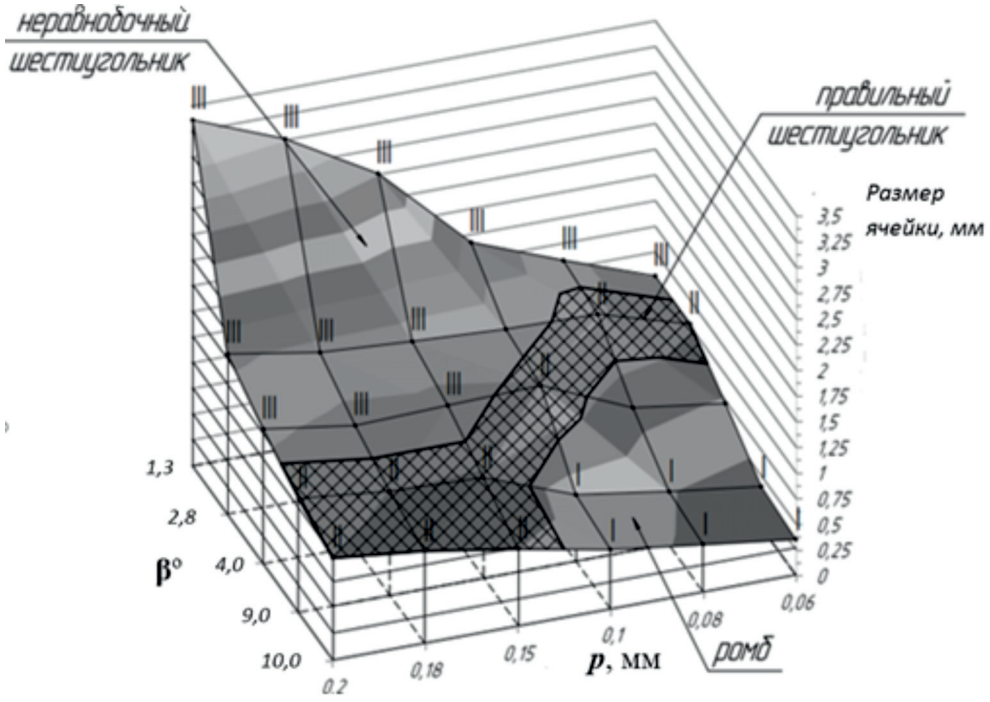


Рис. 9. Зависимость размера ячейки от угла скрещивания β и шага ребер *p*

Fig. 9. Cell size versus cross angle β and fin pitch *p*

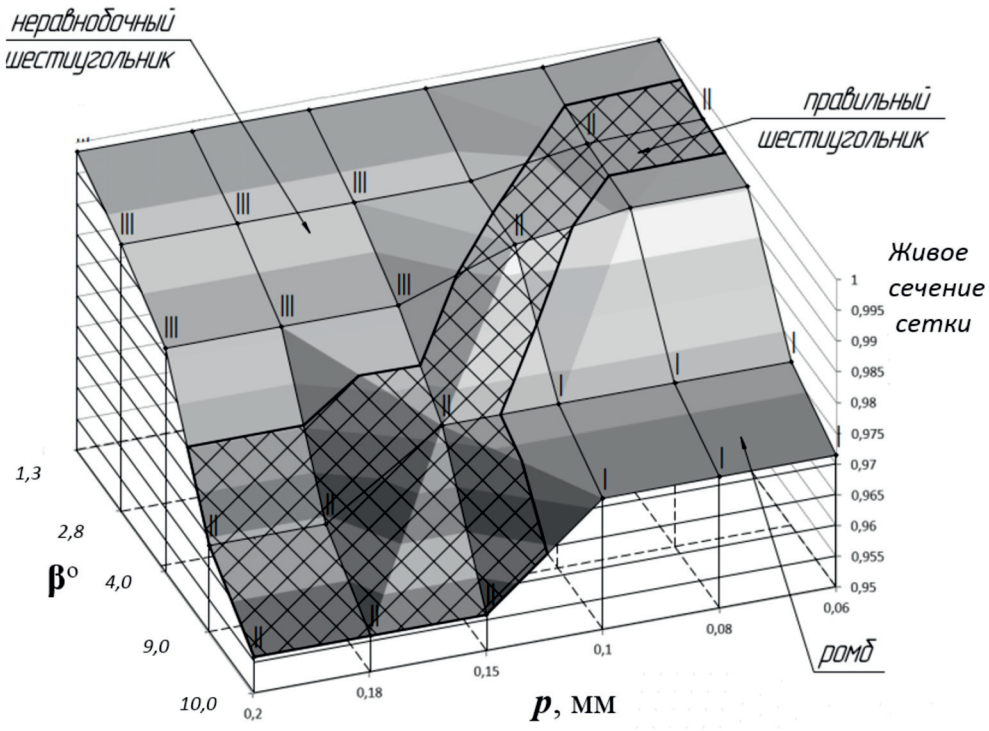


Рис. 10. Зависимость живого сечения сетки от угла скрещивания β и шага ребер *p*

Fig. 10. Effective screening area versus cross angle β and fin pitch *p*

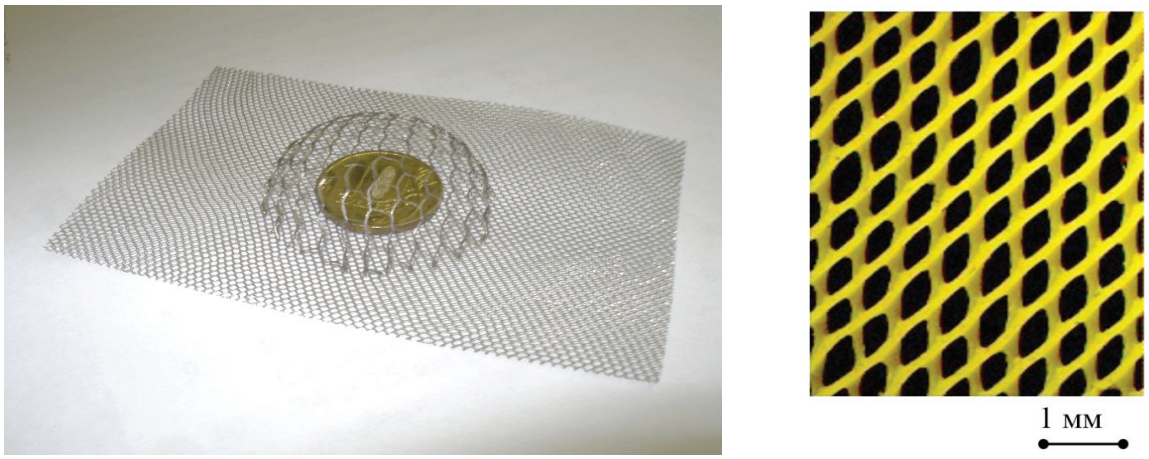
Различная глубина резания t, шаг оребрения p или угол подрезания φ для противоположных сторон заготовки приводит к различной прочности и жесткости ребер, образованных на сторонах заготовки. При растяжении сетки более прочные и жесткие ребра остаются прямолинейными с изгибом менее прочных ребер. Форма образуемой ячейки – параллелограмм с частным случаем образования прямоугольной ячейки. Сетка имеет анизотропию свойств по жесткости в плоскости сетки.

Проведен анализ сочетания стабильности получения оребрения и растяжения сеток. Оптимальный вариант следующий: глубина резания t одинакова для обеих сторон листа и составляет 2/3 от толщины листа. Угол подрезания β и шаг оребрения p также должны быть одинаковы при обработке разных сторон. Из апробированных углов подрезания φ = 30°, φ = 42° и φ = 51° угол подрезания φ = 30° не обеспечивает стабильности процесса ДР при малых шагах оребрения. Для резца с φ = 30° стабильность ДР теряется при шагах менее 0,2 мм/об, особенно при обработке второй стороны. Для угла подрезания φ = 42° процесс устойчив для шагов ребер не менее 0,12 мм. Угол подрезания φ = 51° обеспечивает стабильное оребрение при шагах до 0,06 мм (межреберный зазор составляет 13 мкм). Шаг оребрения p = 0,08 мм обеспечивает не только стабильность ДР, но и стабильность растяжения сетки для всех исследуемых углов скрещивания. Для φ = 51° заготовка растяжной сетки имеет живое сечение Δ всего 5 % и ширину ячейки b = 18 мкм при любых углах встречи β, но при растягивании сетки с малыми углами встречи β живое сечение может быть увеличено до 99 % с размером ячейки в несколько миллиметров.

По сравнению с тканными сетками растяжные сетки на основе ДР имеют возможность пластического деформирования (рис. 11, *а*), что является важным условием их использования в герниопластике.

Для герниопластики важным является также удельная площадь поверхности используемой сетки. После оребрения поверхности на участке, соответствующем величине шага оребрения p, режущей кромкой резца образуются две новые поверхности: одна поверхность – на заготовке и в поперечном сечении соответствует ширине подрезания $m = t/\sin\varphi$, вторая поверхность – на боковой стороне ребра, высота h которого равна ширине подрезания $h = t/\sin\varphi$. Таким образом, добавив к длинам новых поверхностей величину исходной поверхности и разделив на величину шага оребрения p, может быть получен коэффициент увеличения площади поверхности после оребрения K_p:

$$K_p = 1 + \frac{2t}{p \sin\varphi}.$$



а *б*

Рис. 11. Титановые растяжные сетки (*а*), фторопластовая (Ф4) растяжная сетка (*б*), полученные на основе двусторонне-оребренных тонколистовых заготовок

Fig. 11. Titanium stretching meshes (*а*), teflon stretching mesh (*б*), obtained on the basis of both-side finned thin-sheet blanks

Для одностороннего оребрения, например с режимами p = 0,08 мм, t = 0,2 мм и φ = 51°, K_p = 4,2, что означает увеличение площади оребренной поверхности в 4,2 раза по сравнению с площадью исходной поверхности. Оребрение второй стороны листовой заготовки также увеличивает площадь поверхности в 4,2 раза, что суммарно дает увеличение площади поверхности заготовки после двустороннего ДР в 8,4 раза. По сравнению с проволочными сетками сетки, полученные ДР, имеют значительно большую площадь поверхности.

Для герниопластики перспективными также являются сетки из фторопласта Ф4, имеющего наивысшие показатели биосовместимости ввиду его абсолютной химической инертности. На рис. 11, *б* показана растяжная сетка из фторопласта Ф4, полученная на основе ДР.

Выводы

1. Метод деформирующего резания является альтернативным вариантом сквозного прорезания тонколистовых металлических и полимерных заготовок для их последующего растяжения с целью получения сеток большого живого сечения.

2. По сравнению с просечными и тканными сетками сетки, полученные на основе ДР, имеют большую площадь поверхности и повышенную способность к их пластическому деформированию.

3. Обосновано получение форм ячеек ромбической, шестигранной и параллелограммной формы. Управление формой ячейки получаемой растяжной сетки осуществляется выбором угла направления ребер и шагом оребрения на противоположных сторонах заготовки.

4. Наибольший размер ячейки и живое сечение сетки обеспечивают сетки с гексагональными ячейками при углах скрещивания направления ребер на противоположных сторонах заготовки менее 3°.

Список литературы

1. Patent EP 0727269 B1. Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method / N.N. Zubkov, A.I. Ovchinnikov. – Publ. date 13.09.2000.

2. *Ельчинов В.П., Митин Е.В.* Новые нержавеющие кожухотрубные конденсаторы водяного охлаждения: сочетание эффективности и надежности // Холодильный бизнес. – 2014. – № 1. – С. 16–22.

3. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe / A.A. Yakomaskin, V.N. Afanasiev, N.N. Zubkov, D.N. Morskoy // Journal of Heat Transfer. – 2013. – Vol. 135, iss. 10. – P. 101006. – DOI: 10.1115/1.4024502.

4. Novel electrical joints using deformation machining technology. Pt. 2. Experimental verification / L. Solovyeva, N. Zubkov, B. Lisowsky, A. Elmoursi // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 2, N 10. – P. 1718–1722. – DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2199755.

5. *Шуляк Я.И.* Силы резания при деформационном упрочнении аустенитной стали методом деформирующего резания // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 1. – С. 12–19. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19.

6. *Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В.* Особенности закалочного деформирующего резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 35–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49.

7. *Зубков Н.Н.* Однопроходное формирование резьб на пластичных металлах деформирующим резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17.

8. *Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L., Voinov S.A.* Shaping of heat exchanger pins by deformational cutting // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, N 2. – P. 81–85. – DOI: 10.3103/S1068798X16020258.

9. *Zubkov N.N., Sleptsov A.D.* Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes // Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 2016. – Vol. 138, N 1. – P. 011007-1–011007-7. – DOI: 10.1115/1.4030827.

10. Титансодержащие сетчатые эндопротезы, как перспективная группа имплантатов для пластики брюшной стенки / А.А. Казанцев, В.В. Паршиков, К.А. Шемятовский, А.И. Алехин, Д.Л. Титаров, А.А. Колпаков, С.В. Осадченко // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2016. – № 4. – С. 86–95. – DOI: 10.17116/hirurgia2016486-95.

11. *LeBlanc K.A.* Implants used for hernioplasty // Laparoscopic and robotic incisional hernia repair / ed. by K. LeBlanc. – Cham: Springer, 2018. – P. 41–84.

12. *Федоров С.А., Самедова Д.А.* Опыт применения титанового шелка в стоматологии хирургической // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. – 2018. – Т. 8, № 7. – С. 289.

13. *Бадалян А.А., Чернавский А.Ф., Петров И.А.* Клинико-психологические основы формирования

качества жизни при восстановлении биологического рельефа кости с помощью титанового шелка // Проблемы стоматологии. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 56–63.

14. *Smith D., Graciano C., Martinez G.* Recent patents on expanded metal // Recent Patents on Materials Science. Continued as Current Materials Science. – 2009. – Vol. 2, N 3. – DOI: 10.2174/1874464810902030209.

15. *Sparks T., Chase G.* Filters and filtration handbook. – 6th ed. – Boston, MA: Elsevier, 2015. – 444 p. – DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.

16. *Purchas D., Sutherland K.* Handbook of filter media. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2002. – 572 p. – ISBN 9781856173759.

17. Strength to weight ratio research boosts expanded metal // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2006. – Vol. 78, N 5. – DOI: 10.1108/aeat.2006.12778ead.020.

18. *Kooistra G.W., Wadley H.* Lattice truss structures from expanded metal sheet // Materials & Design. – 2007. – Vol. 28, N 2. – P. 507–514. – DOI: 10.1016/j.matdes.2005.08.013.

19. On the influence of structural defects for honeycomb structure / Z. Wang, Z. Li, W. Zhou, D. Hui // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 142, iss. 1. – P. 183–192. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.015.

20. Design and fabrication of aluminum honeycomb structures based on origami technology / L. Wang, K. Saito, Y. Gotou, Y. Okabe // Journal of Sandwich Structures & Materials. – 2019. – Vol. 21, iss. 4. – P. 1224–1242. – DOI: 10.1177/1099636217714646.

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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 41–53
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-41-53

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Expanded Titanium Meshes Based on Deformational Cutting

Nikolai Zubkov *

Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

https://orcid.org/0000-0003-3757-1299, zoubkovn@bmstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 27 December 2019
Revised: 20 January 2019
Accepted: 14 February 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Expanded metal
Mesh
Deformational cutting
Hernioplasty
Filtration
Teflon
Titanium

Funding
This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia (Grant № 9.5617.2017/VU).

Acknowledgements
The author expresses gratitude to *Serguey Korovushkin* for the help in carrying out experiments.

ABSTRACT

Introduction. One of the fields of use of deformational cutting (DC) is the manufacturing of meshes from thin sheet materials. The principle of its production consists in finning of both side of the thin sheet in mutually perpendicular directions with a depth of cut more than half the thickness of the sheet. A significant disadvantage of such meshes is the small effective screening area (the ratio of the total area of holes to the mesh area). One of the promising fields of use of meshes obtained by DC is hernioplasty as titanium implants for the treatment of hernias and reinforcement of bone and soft tissues. Implants require an effective screening area of more than 60 %, high compliance with plastic deformations, and a large specific surface area to hold the tissues sprouting into the implant. In the paper, the DC method is considered as an alternative to the existing titanium woven mesh implants, which have an extremely high cost. **Work objective** is to study the main relationships of obtaining preforms for meshes by the DC method, the features of mesh stretching, and to analyse the resulting shapes and sizes of mesh cells. **In this paper** the two-sided finning of thin-sheet blanks of pure titanium VT1-00 with a mismatched direction of finning of opposite sides of the sheet in the range of fins crossing angles of 1.3°...10° with varying the angle of workpiece undercutting and the fin pitch **were studied**. The analysis of the stretching mechanics for obtaining rhombic, hexagonal, and parallelogram forms of cells was carried out. **Results and discussion.** The range of fin pitch and crossing angles that ensure the stability of the DC and stretching stability is set. The shape of the cell depends on the length of the fins bonding obtained on opposite sides of the sheet. Increasing the bond length with by a decreasing the crossing angle leads to the transition of the cell shape from rhombic to hexagonal. A cell in the form of a parallelogram is typical for the fins of the opposite sides, which have differences in bending strength. **Conclusions:** the method of deformational cutting is an alternative of metal punching for through-cutting sheet metal and polymer for its subsequent stretching in order to obtain meshes. The meshes obtained on the basis of DC have a large surface area and an increased ability to plastic deformation. It is justified to obtain the rhombic, hexagonal, and parallelogram forms of mesh cells. The shape of the mesh cell is controlled by selecting the fins crossing angle and the pitch of the fins on opposite sides of the workpiece. The largest cell size and maximum effective screening area of the mesh are provided by meshes with hexagonal cells form at the fins crossing angles on opposite sides of the workpiece less than 3°.

For citation: Zubkov N.N. Expanded Titanium Meshes Based on Deformational Cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 41–53. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-41-53. (In Russian).

References

1. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. *Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method*. Patent EP 0727269 B1, 2000.

2. El'chinov V.P., Mitin E.V. Novye nerzhaveyushchie kozhukhotrubnye kondensatory vodyanogo okhlazhdeniya: sochetanie effektivnosti i nadezhnosti [New stainless shell-and-tube water-cooled condensers: a combination of efficiency and reliability]. *Kholodil'nyi biznes = Refrigeration Business*, 2014, no. 1, pp. 16–22.

3. Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Morskoy D.N. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe. *Journal of Heat Transfer*, 2013, vol. 135, iss. 10, p. 101006. DOI: 10.1115/1.4024502.

*** Corresponding author**
Zubkov Nikolai N., D.Sc. (Engineering), Professor
Bauman Moscow State Technical University
5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation
Tel.: +7-916-607-7948, **e-mail:** zoubkovn@bmstu.ru

4. Solovyeva L., Zubkov N., Lisowsky B., Elmoursi A. Novel electrical joints using deformation machining technology. Pt. 2. Experimental verification. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2012, vol. 2, no. 10, pp. 1718–1722. DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2199755.

5. Shulyak Ya.I. Sily rezaniya pri deformatsionnom uprochnenii austenitnoi stali metodom deformiruyushchego rezaniya [Cutting Forces During Strain Hardening of Austenitic Steel by the Method of Deformational Cutting]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19.

6. Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Poptsov V.V. Features of quench deformational cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 35–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49. (In Russian).

7. Zubkov N.N. Single pass formation of threads on ductile metals by deformational cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17. (In Russian).

8. Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L., Voinov S.A. Shaping of heat exchanger pins by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 81–85. DOI: 10.3103/S1068798X16020258.

9. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 2016, vol. 138, no. 1, pp. 011007-1–011007-7. DOI: 10.1115/1.4030827.

10. Kazantsev A.A., Parshikov V.V., Shemyatovskii K.A., Alekhin A.I., Titarov D.L., Kolpakov A.A., Osadchenko S.V. Titansoderzhashchie setchatye endoprotezy, kak perspektivnaya gruppa implantatov dlya plastiki bryushnoi stenki [The titanium-containing mesh as a perspective group of implants for abdominal wall repair]. *Hirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2016, no. 4, pp. 86–95. DOI: 10.17116/hirurgia2016486-95.

11. LeBlanc K.A. Implants used for hernioplasty. *Laparoscopic and robotic incisional hernia repair*. Ed. by K. LeBlanc. Cham, Springer, 2018, pp. 41–84.

12. Fedorov S.A., Samedova D.A. Opyt primeneniya titanovogo shelka v stomatologii khirurgicheskoi [Experience in using titanium silk in surgical dentistry]. *Byulleten' meditsinskikh Internet-konferentsii = Bulletin of medical Internet conferences*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 289.

13. Badalyan A.A., Chernavsky A.F., Petrov I.A. Kliniko-psikhologicheskie osnovy formirovaniya kachestva zhizni pri vosstanovlenii biologicheskogo rel'efa kosti s pomoshch'yu titanovogo shelka [Clinical and psychological bases of forming the quality of life when restoring the biological relief of bone using titanium silk]. *Problemy stomatologii = Actual problems in dentistry*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 56–63.

14. Smith D., Graciano C., Martinez G. Recent patents on expanded metal. *Recent Patents on Materials Science. Continued as Current Materials Science*, 2009, vol. 2, no. 3. DOI: 10.2174/1874464810902030209.

15. Sparks T., Chase G. *Filters and filtration handbook*. 6th ed. Boston, MA, Elsevier, 2015. 444 p. DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.

16. Purchas D., Sutherland K. *Handbook of filter media*. 2nd ed. Oxford, Elsevier Advanced Technology, 2002. 572 p. ISBN 9781856173759.

17. Strength to weight ratio research boosts expanded metal. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2006, vol. 78, iss. 5. DOI: 10.1108/aeat.2006.12778ead.020.

18. Kooistra G.W., Wadley H. Lattice truss structures from expanded metal sheet. *Materials & Design*, 2007, vol. 28, iss. 2, pp. 507–514. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.08.013.

19. Wang Z., Li Z., Zhou W., Hui D. On the influence of structural defects for honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 142, iss. 1, pp. 183–192. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.015.

20. Wang L., Saito K., Gotou Y., Okabe Y. Design and fabrication of aluminum honeycomb structures based on origami technology. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2019, vol. 21, iss. 4, pp. 1224–1242. DOI: 10.1177/1099636217714646.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 54–64
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-54-64

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние нанесения диффузионных титановых покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на механические свойства режущего твердосплавного инструмента

Эдуард Бобылёв [a, *], *Наталья Клокова* [b]

Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, г. Краснодар, 350072, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-7754-1807, ebobylev@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-5781-7829, msat_kubgtu@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.5

История статьи:
Поступила: 07 декабря 2019
Рецензирование: 19 декабря 2019
Принята к печати: 30 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Режущий твердосплавной инструмент
Диффузионные титановые покрытия
Стойкость инструмента
Механические свойства
Карбид титана

Финансирование
Исследования выполнены по гранту, предоставленному Российским Фондом фундаментальных исследований, договор № 18-38-00382.

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из наиболее распространенных способов улучшения эксплуатационных характеристик режущего твердосплавного инструмента является нанесение на его поверхность функциональных покрытий. При этом широкое распространение получили покрытия на основе карбида титана TiC. Достаточно высокий научный и практический интерес с точки зрения формирования функциональных покрытий представляет технология диффузионной металлизации режущих инструментов, изготовленных из твердых сплавов, в расплавах Pb-Bi-Li-Ti, позволяющая многократно повысить их стойкость. Однако влияние функциональных покрытий на основе карбида титана TiC на механические свойства твердых сплавов описано недостаточно полно. **Цель работы:** анализ влияния диффузионного насыщения режущего твердосплавного инструмента в среде Pb-Bi-Li-Ti на их механические характеристики. **Методами исследования** являлись испытания на макро- и микротвердость, исследования предела прочности при изгибе, ударной вязкости и вязкости разрушения. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что сформировавшиеся функциональные диффузионные слои влияют на механические характеристики покрытых инструментов. При этом основное влияние на механические свойства покрытых изделий оказывала температура диффузионного насыщения и его длительность. При формировании диффузионных слоев толщиной до 5 мкм для сплавов группы ВК предел прочности при изгибе, ударная вязкость и вязкость разрушения плавно возрастают, при дальнейшем увеличении толщины происходит снижение вышеуказанных характеристик, для сплавов типа ТК толщина составляет 4 мкм. Было выявлено, что нанесение диффузионных титановых покрытий способно увеличить такие механические характеристики твердосплавного инструмента, как твердость (до 91 HRA), предел прочности при изгибе (для сплавов ТК – 1380 МПа, для сплавов ВК – 1875 МПа), ударную вязкость (для сплавов ТК – 2,99 кДж/м^2, для сплавов ВК – 5,97 кДж/м^2) и вязкость разрушения (для сплавов ТК – 7,65 МПа, для сплавов ВК – 11,9 МПа).

Для цитирования: *Бобылёв Э.Э., Клокова Н.Л.* Влияние нанесения диффузионных титановых покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на механические свойства режущего твердосплавного инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 54–64. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-54-64.

Введение

При обработке металлов резанием наиболее широкое распространение получили режущие инструменты, изготовленные из порошковых твердых сплавов типа ТК и ВК. Такие материалы обладают высокой твердостью, износостойкостью, теплостойкостью, что обеспечивает им высокую производительность процесса резания. Как известно, наибольшее влияние на свойства материалов оказывает состояние их поверхностного слоя, при этом свойства могут изменяться в широком диапазоне за счет нанесения покрытий на поверхность материала. Наиболее значимой отличительной особенностью режущего инструмента является его износостойкость, поэтому наибольшее применение по отношению к режущему инструменту находят износостойкие покрытия [1–10].

***Адрес для переписки**
Бобылёв Эдуард Эдуардович, старший преподаватель
Кубанский государственный технологический университет,
ул. Московская, 2,
350072, г. Краснодар, Россия
Тел: +7-918-975-8933; **e-mail:** ebobylev@mail.ru

Увеличению износостойкости режущего инструмента способствуют покрытия на основе таких химических соединений, как карбиды, нитриды, бориды, главной особенностью которых является высокая микротвердость и высокая температурная стабильность [3–7]. При этом наиболее распространенными элементами для нанесения покрытий являются хром, титан, кремний, вольфрам и т. д. При этом карбид титана TiC представляет существенный интерес, поскольку он обладает высокой микротвердостью – до 32 000 МПа и высокой термической стабильностью [8–14]. Современные технологические способы повышения свойств инструментов за счет нанесения покрытий можно разбить на три группы: химическое осаждение элементов покрытий (CVD), физическое осаждение элементов покрытий (PVD) и химико-термическая обработка [1–2, 6–7, 8–15].

Диффузионное насыщение твердых сплавов титаном в расплавах Pb-Bi-Li-Ti является перспективной упрочняющей технологией в связи с возможностью получения покрытий на основе карбида титана TiC, представляющих собой диффузионно-насыщенные слои, что является преимуществом с точки зрения качества покрытий по сравнению с покрытиями, получаемыми методами PVD и CVD [16–18].

Известны работы, направленные на изучение механических свойств деталей, изготовленных из сталей и твердых сплавов, на поверхность которых было нанесено покрытие из карбида титана при помощи технологий PVD и CVD [9, 10, 13, 14]. Однако в настоящее время не существует данных о влиянии диффузионного титанирования в расплавах Pb-Bi-Li-Ti на механические свойства твердосплавного режущего инструмента. Нет зависимостей, описывающих влияние таких характеристик покрытия, как толщина и микротвердость, на механические свойства покрытого изделия, также отсутствуют данные о влиянии на механические свойства таких технологических параметров, как температура диффузионного насыщения и длительность.

***Цель работы*:** анализ влияния диффузионного насыщения режущего твердосплавного инструмента в среде Pb-Bi-Li-Ti на их механические характеристики.

Методика исследований

Диффузионное насыщение проводилось по разработанной и запатентованной технологии [20, 21]. Важно отметить, что при диффузионном насыщении по выбранной технологии деталь обрабатывается в несколько стадий: предварительная высокотемпературная цементация, диффузионное насыщение, термическая обработка.

Диффузионному насыщению подвергались образцы из твердых сплавов ТК и ВК, подготовленные по ГОСТ 20019–74, размерами 35×5×5 мм.

При диффузионном насыщении в расплавах покрываемые изделия погружаются в расплав, являющийся реакционно-транспортной средой. Расплав Pb-Bi-Li имеет эвтектический состав, в который в количестве до 5 % добавлялся титан. Расплав нагревают до необходимой температуры, затем в него погружаются покрываемые образцы. Образцы находятся в расплаве от 10 мин до 5 ч в изотремическом режиме. За это время элементы покрытия диффундируют в поверхностный слой изделия, легируют их и образуют диффузионное покрытие [16–19]. Технология диффузионного насыщения в расплавах Pb-Bi-Li-Ti основана на явлении изотермического переноса масс. Так, элемент-диффузант (в данном случае титан), находясь в расплаве, диффундирует к поверхности покрываемого изделия и образует в поверхностных слоях карбид титана TiC [16–19].

Перед процессом диффузионного насыщения изделия подвергались кратковременной высокотемпературной цементации в вакууме. Цементация служит для исключения явления декарбидизации слоя материала-основы под покрытием. Явление декарбидизации ухудшает механические характеристики покрытых изделий за счет появления зоны под покрытием, отличающейся пониженной твердостью. Цементация проводилась в пропан-бутановой смеси.

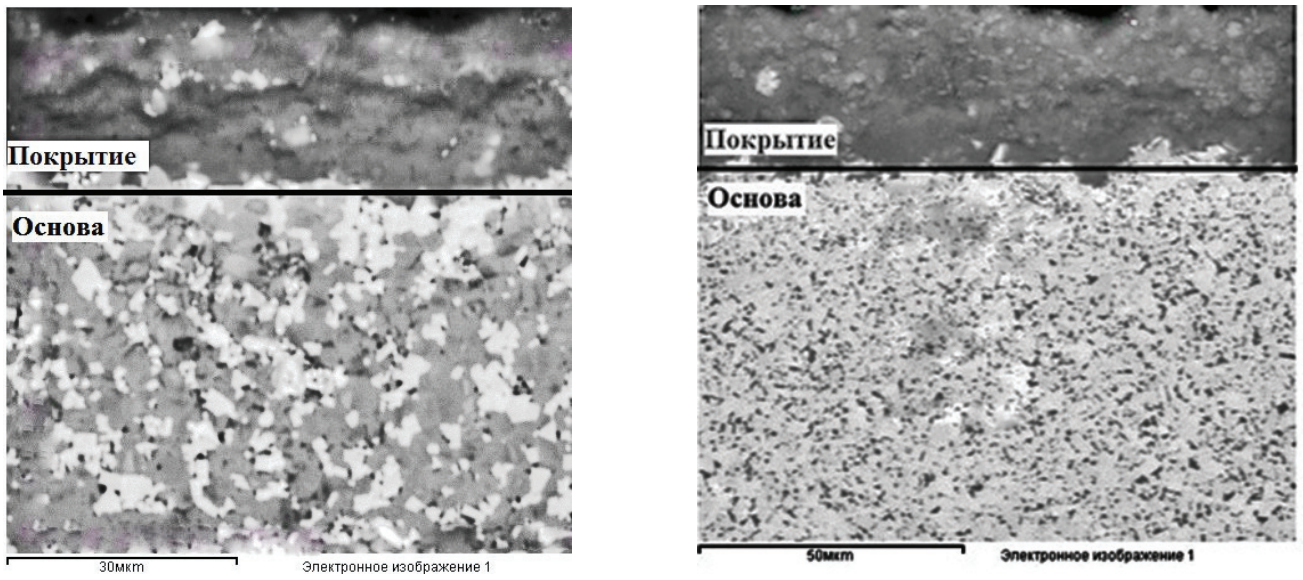
Нанесение покрытий осуществлялось в разработанной и запатентованной установке для диффузионного насыщения [16–19]. Особенность установки состоит в том, что она позволяет проводить обработку в открытой ванне, а также совмещать процесс диффузионного насыщения с термической обработкой.

Исследование механических свойств твердых сплавов с покрытиями и без покрытий осуществлялось по стандартным методикам в соответствии с требованиями ГОСТов.

В ходе исследования измерялась твердость пластин по методу Роквелла. Твердость определялась на твердомере ТК-2М по шкале «А». Металлографические исследования проводились на косых микрошлифах. Измерялась также микротвердость структурных составляющих поверхностного слоя. Микротвердость определялась по методу Виккерса на микротвердомере EmcoTest DuraScan80 при нагружении до 0,49 Н. Производилась серия из трех этапов измерений, после чего строился график изменения микротвердости.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования было выявлено, что вследствие диффузионного насыщения титаном твердых сплавов типа ТК и ВК из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на их поверхности формируются износостойкие покрытия на основе карбида титана TiC. На рис. 1 представлены микрофотографии твердых сплавов Т15К6 и ВК8 с нанесенным на их поверхность покрытием. На кинетику диффузионного переноса масс влияет состав поверхностного слоя покрываемого изделия и его матрицы. Поэтому условно покрытие можно рассматривать, как состоящее из двух слоев: поверхностного (3…6 мкм) и переходного (до 20 мкм). Поверхностный слой образуется вследствие взаимной диффузии углерода из цементованного слоя в титан и характеризуется высоким содержанием карбида титана TiC. При этом при возрастании температуры микротвердость увеличивается за счет повышения содержания в поверхностном слое карбидов титана TiC [16, 18]. Массоперенос в переходной зоне характеризуется наличием в матрице карбидов титана TiC, вольфрама WC, кобальта Co и их диффузионных параметров. Таким образом, формирование переходного слоя протекает за счет взаимной диффузии между элементами покрытия и элементами покрываемого материала. Очевидно, что на микроструктурах выделить переходную зону невозможно. Подробнее кинетика формирования покрытия, а также элементный и фазовый состав рассмотрены в работе [16]. При этом основной упрочняющий эффект достигается на стадии диффузионного насыщения, поскольку при предварительной цементации кобальтовая связка, вступающая во взаимодействие с углеродом, способствует образованию карбида кобальта Co_2C, обладающего намного меньшей



а *б*

Рис. 1. Диффузионное титановое покрытие на твердом сплаве:
а – Т15К6; *б* – ВК8

Fig. 1. Diffusion titanium coating on hard alloy:
а – 79 %WC–15 %TiC–6%Co; *б* – 92 %WC–8 %Co

твердостью, чем карбиды TiC и WC, из которых состоит твердый сплав [16, 18].

Было выявлено, что нанесение диффузионных титановых покрытий существенно влияет на износостойкость покрытый твердых сплавов. При этом износостойкость инструмента с покрытием зависит от его макротвердости, микротвердости нанесенного на его поверхность покрытия, толщины покрытия. Вышеперечисленные характеристики диффузионных титановых покрытий способны существенно увеличить эксплуатационные свойства режущего твердосплавного инструмента, при этом они зависят от режимов нанесения покрытий – температуры процесса диффузионного насыщения и его длительности. Твердость пластин после диффузионного насыщения может увеличиваться до 91 HRA, твердость пластин до диффузионного насыщения составляла не более 90 HRA (рис. 2). При этом микротвердость пластин после диффузионного насыщения достигает 30 000 МПа, микротвердость твердого сплава Т15К6 без покрытия составляет 18 600 МПа, ВК8 – 16 400 МПа. Подробно влияние покрытий на структуру, микротвердость, элементный и фазовый состав поверхностных слоев инструментов описано в работах [16, 18].

Установлено, что нанесение диффузионных титановых покрытий на поверхность твердосплавного режущего инструмента влияет на свойства материала как при статическом, так и при динамическом нагружении.

Изменение механических характеристик покрытого материала обеспечивается за счет формирования на его поверхности покрытия на основе карбида титана TiC.

Нанесение диффузионных титановых покрытий способствует увеличению прочности при изгибе твердосплавного инструмента. При этом для сплава ВК8 до диффузионного насыщения предел прочности при изгибе составлял 1630 МПа, после диффузионного насыщения наблюдается увеличение предела прочности при изгибе до 1875 МПа, для сплава Т15К6 до диффузионного насыщения предел прочности составлял 1200 МПа, после диффузионного насыщения произошло его увеличение до 1380 МПа.

На свойства покрытого материала влияет структурно-фазовый состав нанесенного на его поверхность покрытия, который зависит от режимов нанесения покрытия. Однако слишком большое содержание карбида титана TiC в покрытии способно снизить механические свойства материала за счет увеличения хрупкости. Диффузионное насыщение сплавов типа ТК, обладающих большей твердостью, чем сплавы ВК, при повышенных температурах приводит к снижению механических характеристик. Так, повышение температуры диффузионного насыщения сплава ВК8 до 1100 °С, напротив, способствует увеличению прочности на изгиб до 1875 МПа. При дальнейшем возрастании температуры наблюдается резкое снижение предела прочности на изгиб. При насыщении сплава Т15К6 наи-

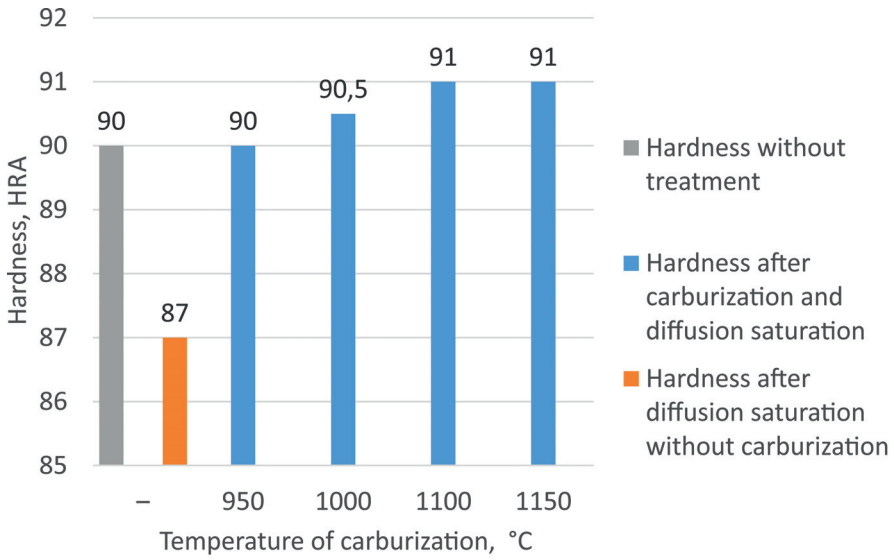


Рис. 2. Твердость пластин после диффузионного насыщения

Fig. 2. Hardness of plates after diffusion saturation

большее увеличение предела прочности на изгиб наблюдается при температуре 1000 °С и составляет 1380 МПа. Зависимость предела прочности на изгиб от температуры нанесения покрытия представлена на рис. 3.

В ходе исследований установлено, что толщина поверхностного слоя покрытия, содержащая наибольшее количество карбидов, оказывает значительное влияние на предел прочности при изгибе. Стоит отметить, что толщина покрытия на сплавах ТК и ВК влияет на их прочностные свойства по-разному. Для исследования влияния толщины покрытия на предел прочности при изгибе диффузионное насыщение сплавов типа ТК происходило при температуре 1000 °С, для сплава типа ВК при температуре 1100 °С. Для сплавов типа ВК наибольшее увеличение предела прочности обеспечивается при формировании покрытий толщиной 5 мкм, значение предела прочности составляет 1875 Мпа. Для сплавов ТК наибольшее увеличение предела прочности наблюдается при формировании покрытия толщиной 4 мкм, при прочности на изгибе составляет 1380 МПа. В случае формирования покрытия большей толщины наблюдается снижение значений предела прочности. Это объясняется тем, что покрытие формируется на основе карбида титана TiC [16], обладающего высокой хрупкостью. При этом при увеличении толщины покрытия происходит возрастание дефектов структуры материала, что также снижает механические свойства покрытого изделия. Зависимость предела прочности при изгибе от толщины покрытия представлена на рис. 4.

Диффузионное насыщение твердых сплавов в среде Pb-Bi-Li-Ti также влияет на динамические прочностные характеристики твердых сплавов, в частности, на ударную вязкость и трещиностойкость.

Ударная вязкость сплава ВК8 без покрытия составляет 5,69 кДж/м^2, у сплава Т15К6 ударная вязкость составляет 2,84 кДж/м^2. Формирующийся вследствие диффузионного насыщения диффузионный слой характеризуется повышенной по сравнению с материалом-основой микротвердостью, которая может достигать 30 000 МПа [16–18]. Как правило, в таком случае наблюдается снижение ударной вязкости. Однако твердый сплав, являющийся порошковым материалом, имеет на поверхности концентраторы напряжений в виде пор. В случае диффузионного насыщения наблюдается уменьшение количества пор в поверхностном слое, что способствует некоторому увеличению ударной вязкости. При этом ударная вязкость, так же как и предел прочности при изгибе, зависит от режимов диффузионного насыщения.

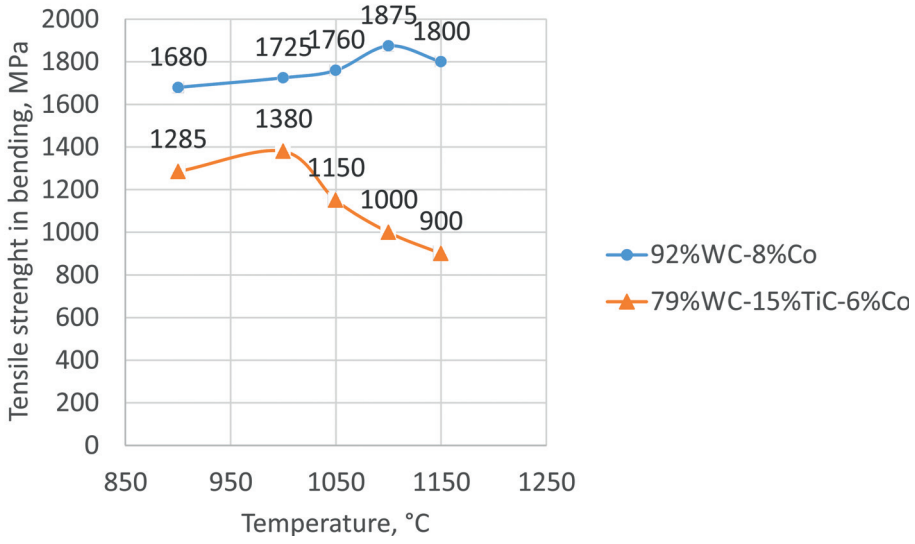


Рис. 3. Зависимость предела прочности при изгибе от температуры нанесения покрытия

Fig. 3. Dependence of tensile strength in bending on diffusion saturation temperature

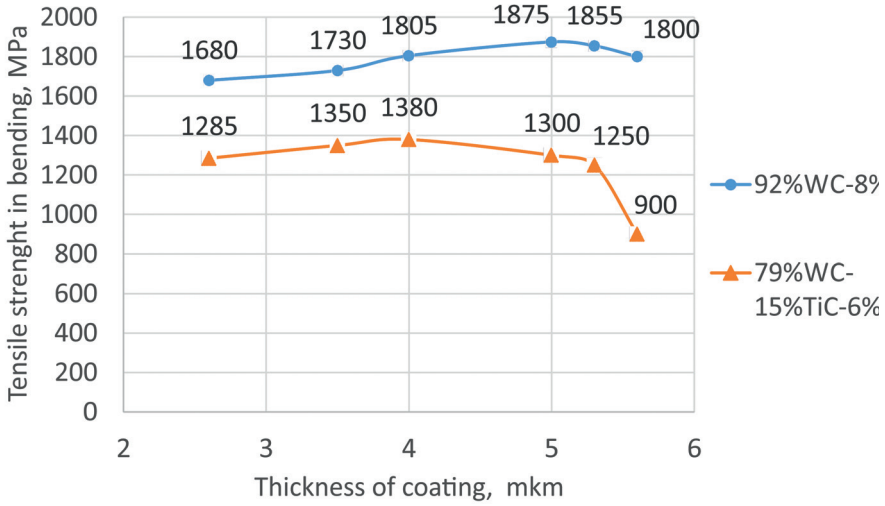


Рис. 4. Зависимость предела прочности при изгибе от толщины покрытия

Fig. 4. Dependence of tensile strength in bending on coatings thickness

Было выявлено, что ударная вязкость инструментов после диффузионного насыщения в среде Pb-Bi-Li-Ti снижается при увеличении температуры насыщения, что обусловлено увеличением количества карбида титана TiC в поверхностных слоях покрываемого изделия. Однако наибольшая эффективность процесса резания инструментом группы ВК наблюдается при нанесении покрытия при температуре около 1100 °С, инструментом группы ТК – при 1000 °С [18]. Несмотря на это при данных температурах значения ударной вязкости не максимальны. Зависимость ударной вязкости от температуры нанесения покрытия показана на рис. 5.

При анализе влияния толщины диффузионных покрытий на ударную вязкость выявлено, что увеличение толщины покрытия отрицательно влияет на ударную вязкость. Максимальные значения ударной вязкости наблюдались для сплавов группы ТК при толщине покрытия 4 мкм, для сплавов группы ВК – при 5 мкм. При дальнейшем увеличении толщины покрытий наблюдается снижение ударной вязкости, что объясняется увеличением количества дефектов структуры покрытия и влиянием хрупкого карбида титана. Зависимость ударной вязкости от толщины покрытия представлена на рис. 6.

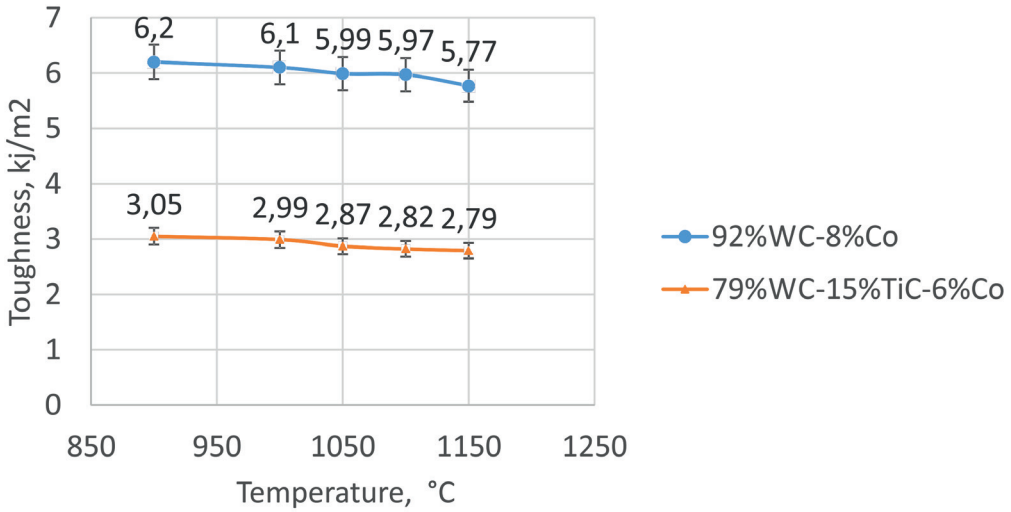


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости от температуры нанесения покрытия

Fig. 5. Dependence of toughness on the temperature of the coating

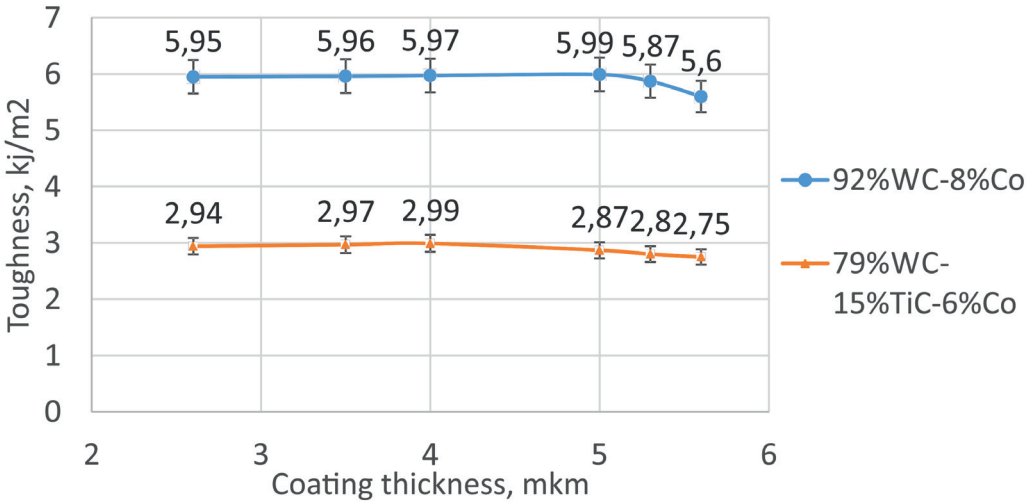


Рис. 6. Зависимость ударной вязкости от толщины покрытия

Fig. 6. Dependence of fracture toughness on diffusion saturated layer thickness

Диффузионное насыщение твердых сплавов ТК и ВК в расплаве Pb-Bi-Li-Ti способствует незначительному увеличению вязкости разрушения $К_{1с}$. Для твердого сплава ВК8 без покрытия вязкость разрушения составляет 11,6 МПа, для сплава Т15К6 – 7,2 МПа. Увеличение вязкости разрушения также связано с уменьшением количества пор и различных дефектов на поверхности инструмента после нанесения покрытия. Нанесение диффузионных титановых покрытий в определенных режимах способствует увеличению вязкости разрушения сплавов типа ВК в среднем на 3 %, сплавов типа ТК – на 6 %.

Как было отмечено выше, диффузионное насыщение твердого сплава способствует некоторому увеличению ударной вязкости, однако с увеличением температуры насыщения данный показатель снижается. На сплавах типа ТК, обладающих изначально меньшей ударной вязкостью, чем сплавы ВК, увеличение температуры диффузионного насыщения оказывает большее влияние. При наиболее высоких температурах насыщения наблюдается охрупчивание поверхностного слоя инструмента, что ведет к снижению вязкости разрушения до показателей инструмента без покрытия (рис. 7).

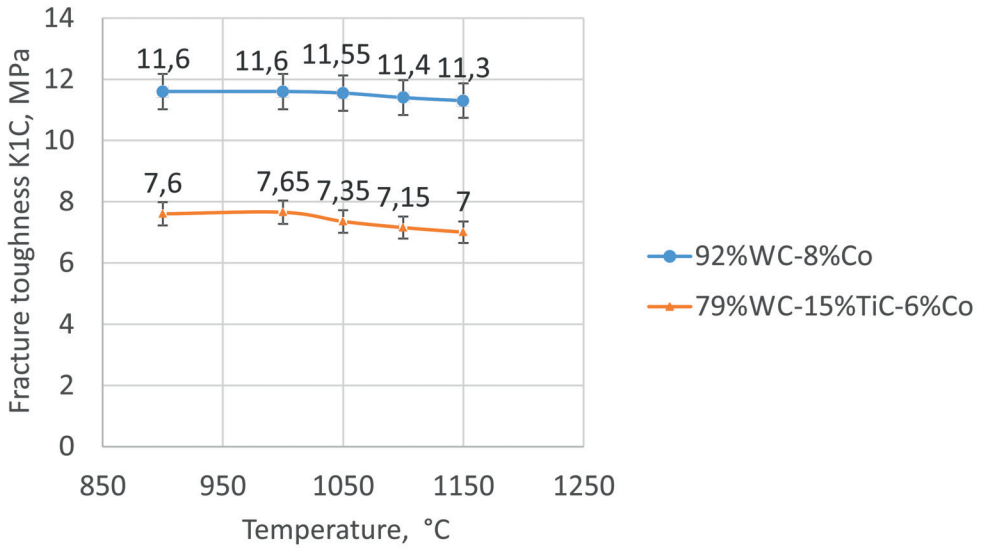


Рис. 7. Зависимость вязкости разрушения от температуры нанесения покрытия

Fig.7. Dependence of fracture toughness on diffusion saturation temperature

Было также установлено, что на вязкость разрушения влияет толщина диффузионного покрытия. При увеличении толщины покрытия до 4 мкм для сплава типа ТК и до 5 мкм для сплава типа ВК происходит незначительное увеличение вязкости разрушения, при дальнейшем увеличении толщины покрытия показатель снижается. Зависимость вязкости разрушения от толщины покрытия представлена на рис. 8.

Таким образом, диффузионное насыщение твердых сплавов в расплавах Pb-Bi-Li-Ti способствует увеличению таких механических характеристик твердых сплавов типа ТК и ВК, как твердость – до 91 HRA; предел прочности при изгибе для сплавов ТК – до 1380 МПа, для сплавов ВК – до 1875 МПа; ударная вязкость для сплавов ТК – до 2,99 кДж/м^2, для сплавов ВК – до 5,97 кДж/м^2; вязкость разрушения для сплавов ТК – до 7,65 МПа, для сплавов ВК – до 11,9 МПа. Увеличение механических характеристик покрытого инструмента способствует увеличению эксплуатационных характеристик покрытого режущего инструмента, что способствует увеличению производительности процесса механической обработки. Однако при формировании толстых покрытий, а также покрытий, нанесенных при повышенных температурах, механические характеристики, кроме предела прочности при изгибе на сплавах ВК, снижаются относительно инструмента без покрытия, что обусловлено наличием в диффузионном слое большого количества хрупкого карбида титана TiC.

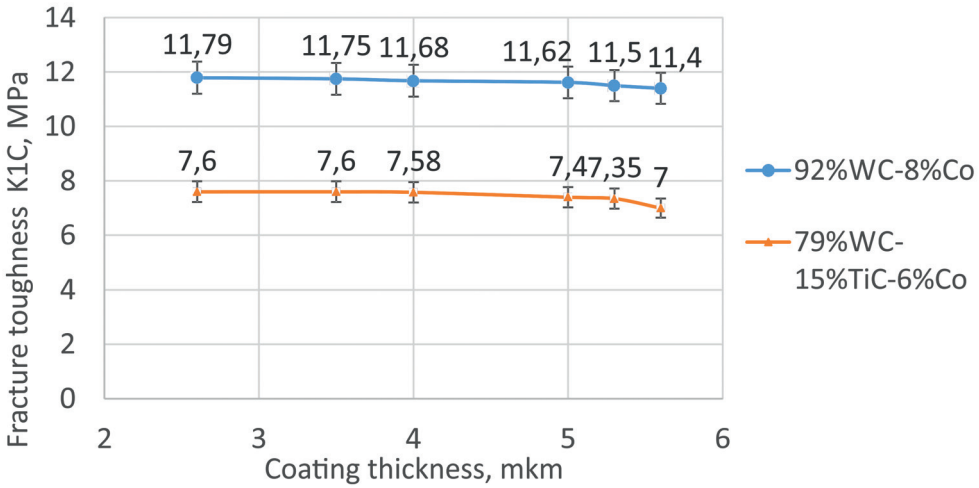


Рис. 8. Зависимость вязкости разрушения от толщины покрытия

Fig. 8. Dependence of facture toughness on diffusion saturated layer thickness

Выводы

1. Установлено влияние диффузионного насыщения твердосплавного инструмента типа ТК и ВК титаном из среды Pb-Bi-Li-Ti на его механические характеристики благодаря формированию на его поверхности функционального покрытия.

2. Механические характеристики инструментов с покрытием увеличиваются при малой толщине покрытия (до 4…5 мкм) и уменьшаются при формировании толстых покрытий вследствие увеличения количества дефектов.

3. Увеличение механических характеристик также наблюдается при пониженных температурах насыщения (900…1000 ºС). При повышении температуры нанесения наблюдается снижение механических характеристик режущего инструмента, что понижает стойкость инструмента при дальнейшем его использовании.

Список литературы

1. *Ильин А.А., Строганов Г.Б., Скворцова С.В.* Покрытия различного назначения для металлических материалов: учебное пособие. – М.: Альфа-М: Инфра-М, 2013. – 144 с. – (Современные технологии. Магистратура). – ISBN 978-5-98281-355-8.

2. *Григорьев С.Н.* Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов втузов. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-94275-591-1.

3. *Bobzin K.* High-performance coatings for cutting tools // CIRP Journal of Manufacturing Science and

Technology. – 2017. – Vol. 18. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.

4. *Caliskan H., Panjan P., Curbanoglu C.* Hard coatings on cutting tools and surface finish // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Comprehensive Materials Finishing. – 2017. – Vol. 3. – P. 230–242. – DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5.

5. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools / R. Haubner, M. Lessiak, R. Pitonak, A. Köpf, R. Weissenbacher // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2017. – Vol. 62. – P. 210–218. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009.

6. High temperature oxidation and cutting performance of AlCrN, TiVN and multilayered AlCrN/TiVN hard coatings / Y.-Y. Chang, S.-Y. Weng, C.-H. Chen, F.-X. Fu // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 332. – P. 494–503. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.080.

7. *Cardarelli F., Taxil P., Savall A.* Tantalum protective thin coating techniques for the chemical process industry: molten salts electrocoating as a new alternative // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 1996. – Vol. 14, iss. 5–6. – P. 365–381.

8. Understanding the diffusion wear mechanisms of WC-10%Co carbide tools during dry machining of titanium alloys / C. Ramirez, A. Idhil Ismail, C. Gendarme, M. Dehmas, E. Aeby-Gautier, G. Poulachon, F. Rossi // Wear. – 2017. – Vol. 390–391. – P. 61–70. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.07.003.

9. *Платонов Г.Л., Аникин В.Н., Аникеев А.И.* Изучение роста износостойких слоев из карбида титана на твердых сплавах // Порошковая металлургия. – 1980. – № 8 (212). – С. 48–52.

10. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук. – Киев: Техника, 1991. – 168 с. – ISBN 5-335-00501-7.

11. Formation of Titanium Carbide (TiC) and TiC@C core-shell nanostructures by ultra-short laser ablation of titanium carbide and metallic titanium in liquid / A. De Bonis, A. Santagata, A. Galasso, A. Laurita, R. Teghil // Journal of Colloid and Interface Science. – 2017. – Vol. 489. – P. 76–84. – DOI: 10.1016/j.jcis.2016.08.078.

12. Titanium carbide coating with enhanced tribological properties obtained by EDC using partially sintered titanium electrodes and graphite powder mixed dielectric / Z.J. Xie, Y.J. Mai, W.Q. Lian, S.L. He, X.H. Jie // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 300. – P. 50–57. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.080.

13. Effect of titanium carbide coating on the osseointegration response in vitro and in vivo / M. Bramaa, N. Rhodese, J. Hunte, A. Ricci, R. Teghil, S. Migliaccio, C.D. Rocca, S. Leccisotti, A. Lioi, M. Scandurra, G. De Maria, D. Ferro, F. Pu, G. Panzini, L. Politi, R. Scandurra // Biomaterials. – 2007. – Vol. 28, iss. 4. – P. 595–608. – DOI: 10.1016/j.biomaterials.2006.08.018.

14. On the effect of the substrate to target position on the properties of titanium carbide/carbon coatings / J. Daniel, P. Soucek, L. Zábranský, V. Buršíková, M. Stupavská, P. Vašina // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 328. – P. 462–468. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.076.

15. *Balogh Z., Schmitz G.* Diffusion in metals and alloys // Physical Metallurgy. – 5th ed. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – Vol. 1. – P. 387–559. – DOI: 10.1016/b978-0-444-53770-6.00005-8.

16. *Бобылёв Э.Э., Соколов А.Г.* Элементно-фазовый состав и свойства диффузионных титановых покрытий на режущем твердосплавном инструменте типа ТК и ВК // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 222–228. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-3-222-228.

17. *Sokolov E.G., Artem'ev V.P.* Effect of pores in powder materials on the formation of titanium and chromium diffusion coatings // Metal Science and Heat Treatment. – 2002. – Vol. 44, N 9–10. – P. 459–459. – DOI: 10.1023/A:1021981401891.

18. *Соколов А.Г., Бобылёв Э.Э.* Влияние диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на работоспособность режущего твердосплавного инструмента типа ТК и ВК // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 46–59. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-46-59.

19. *Chaevsky M.* Comparison of methods of formation of protective coating from high-temperature liquid media // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. – Vol. 43, N 11–12. – P. 446–466.

20. Патент 2451108 Российская Федерация, МПК C 23 C 10/26 (2006.01). Способ обработки инструмента из стали или твердого сплава / А.Г. Соколов, Мансиа Салахалдин. – Опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14. – 5 с.

21. Патент 2521187 Российская Федерация, МПК C 23 C 10/18; C 23 C 2/04 (2006.01). Устройство для диффузионной металлизации в среде легкоплавких жидкометаллических растворов / А.Г. Соколов. – Опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 8 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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 54–64
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-54-64

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Influence of Diffusion Saturation from Liquid Metal media Solutions to Mechanical Properties of Hard Alloy Cutting Tool

Eduard Bobylyov [a, *], ***Natalya Klokova*** [b]

Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-7754-1807, ebobylev@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-5781-7829, msat_kubgtu@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 07 December 2019
Revised: 19 December 2019
Accepted: 30 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Carbide-tipped tool
Diffusion titanium coatings
Tool life
Mechanical properties
Titanium carbide

Funding
The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (contract No 18-38-00382).

ABSTRACT

Introduction. One of the most popular ways to increase operational properties of cutting carbide-tipped tool is applying functional coatings on its surface. At the same time, coatings based on titanium carbide TiC are widely used. A sufficiently high scientific and practical interest, from the point of view of the formation of functional coatings, is the technology of diffusion metallization of cutting tools made of hard alloys in Pb-Bi-Li-Ti melts, which can significantly increase its resistance. However, the effect of functional coatings based on titanium carbide TiC on the mechanical properties of hard alloys is described insufficiently. **The purpose of the work** is to analyze the effect of diffusion saturation of a carbide cutting tool in a Pb-Bi-Li-Ti medium on its mechanical characteristics. **The methods of investigation** are the following: tests for macro- and microhardness, studies of flexural strength, impact strength and fracture toughness. **Results and Discussion.** It is revealed that the formed functional diffusion layers affect the mechanical characteristics of coated instruments. In this case, the main influence on the mechanical properties of the coated products is exerted by the temperature of diffusion saturation and its duration. When forming diffusion layers with a thickness of up to 5 μm for VK alloys, the flexural strength, impact strength and fracture toughness gradually increase, with a further increase in thickness, the above characteristics decrease, for TK alloys the thickness is 4 μm. It is found that the application of diffusion titanium coatings can increase such mechanical characteristics of carbide tools as hardness (up to 91 HRA), tensile strength in bending (for 9%WC-15%TiC-6%Co – 1380 MPa, for 92%WC-8%Co – 1875 MPa), impact strength (for 79%WC-15%TiC-6%Co – 2.99 kJ/m^2, for 92%WC-8%Co – 5.97 kJ/m^2) and fracture toughness (for 79%WC-15%TiC-6%Co – 7.65 MPa, for 92%WC-8%Co – 11.9 MPa).

For citation: Bobylyov E.E., Klokova N.L. Influence of Diffusion Saturation from Liquid Metal media Solutions to Mechanical Properties of Hard Alloy Cutting Tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 54–64. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-54-64. (In Russian).

References

1. Il'in A.A., Stroganov G.B., Skvortsova S.V. *Pokrytiya razlichnogo naznacheniya dlya metallicheskikh materialov* [Coatings of various purposes for metallic materials]. Moscow, Al'fa-M Publ., Infra-M Publ., 2013. 144 p. ISBN 978-5-98281-355-8.

2. Grigor'ev S.N. *Metody povysheniya stoikosti rezhushchego instrumenta* [Methods to improve the durability of the cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 368 p. ISBN 978-5-94275-591-1.

3. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, vol. 18, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.

4. Caliskan H., Panjan P., Curbanoglu C. Hard coatings on cutting tools and surface finish. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Comprehensive Materials Finishing*, 2017, vol. 3, pp. 230–242. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5.

*** Corresponding author**
Bobylyov Eduard Ed., Senior Lecturer
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya st.,
350072, Krasnodar, Russian Federation
Tel.: +7-918-975-8933; **e-mail**: ebobylev@mail.ru

5. Haubner R., Lessiak M., Pitonak R., Köpf A., Weissenbacher R. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, vol. 62, pp. 210–218. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009.

6. Chang Y.-Y., Weng S.-Y., Chen C.-H., Fu F.-X. High temperature oxidation and cutting performance of AlCrN, TiVN and multilayered AlCrN/TiVN hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 332, pp. 494–503. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.080.

7. Cardarelli F., Taxil P., Savall A. Tantalum protective thin coating techniques for the chemical process industry: molten salts electrocoating as a new alternative. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 1996, vol. 14, iss. 5–6, pp. 365–381. DOI: 10.1016/S0263-4368(96)00034-0.

8. Ramirez C., Idhil Ismail A., Gendarme C., Dehmas M., Aeby-Gautier E., Poulachon G., Rossi F. Understanding the diffusion wear mechanisms of WC-10%Co carbide tools during dry machining of titanium alloys. *Wear*, 2017, vol. 390–391, pp. 61–70. DOI: 10.1016/j.wear.2017.07.003.

9. Platonov G.L., Anikin V.N., Anikeev A.I. Izuchenie rosta iznosostoikikh sloev iz karbida titana na tverdykh splavakh [Growth of wear-resistant titanium carbide layers on hard metals]. *Poroshkovaya metallurgiya = Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1980, no. 8 (212), pp. 48–52. (In Russian).

10. Loskutov V.F., Khizhnyak V.G., Kunitskii Yu.A., Kindrachuk M.V. *Diffuzionnye karbidnye pokrytiya* [Diffusion carbide coatings]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991. 168 p. ISBN 5-335-00501-7.

11. De Bonis A., Santagata A., Galasso A., Laurita A., Teghil R. Formation of Titanium Carbide (TiC) and TiC@C core-shell nanostructures by ultra-short laser ablation of titanium carbide and metallic titanium in liquid. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, vol. 489, pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.08.078.

12. Xie Z.J., Mai Y.J., Lian W.Q., He S.L., Jie X.H. Titanium carbide coating with enhanced tribological properties obtained by EDC using partially sintered titanium electrodes and graphite powder mixed dielectric. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 300, pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.080.

13. Brama M., Rhodes N., Hunt J., Ricci A., Teghil R., Migliaccio S., Rocca C.D., Leccisotti S., Lioi A., Scandurra M., De Maria G., Ferro D., Pu F., Panzini G., Politi L., Scandurra R. Effect of titanium carbide coating on the osseointegration response in vitro and in vivo. *Biomaterials*, 2007, vol. 28, iss. 4, pp. 595–608. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2006.08.018.

14. Daniel J., Soucek P., Zábranský L., Buršíková V., Stupavská M., Vašina P. On the effect of the substrate to target position on the properties of titanium carbide/carbon coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 328, pp. 462–468. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.076.

15. Balogh Z., Schmitz G. Diffusion in metals and alloys. *Physical Metallurgy*. 5th ed. Amsterdam, Elsevier, 2014, vol. 1, pp. 387–559. DOI: 10.1016/b978-0-444-53770-6.00005-8.

16. Sokolov A.G., Bobylyov E.E. The element-phase composition and properties of the surface layers of carbide-tipped tools made of TK and WC-Co alloys. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 222–228. DOI: 10.1023/A:1021981401891. (In Russian).

17. Sokolov E.G., Artem'ev V.P. Effect of pores in powder materials on the formation of titanium and chromium diffusion coatings. *Metal science and Heat Treatment*, 2002, vol. 44, no. 9–10, pp. 459–459. DOI: 10.1023/A:1021981401891.

18. Sokolov A.G., Bobylyov E.E. Influence of the diffusion titanizing from low-melting liquid metal medium on the performance of Ti-WC-Co and WC-Co cutting carbide-tipped tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 46–59. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-46-59. (In Russian).

19. Chaevsky M. Comparison of methods of formation of protective coating from high-temperature liquid media. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, vol. 43, no. 11–12, p. 446–466.

20. Sokolov A.G., Mansia Salakhaldin. *Sposob obrabotki instrumenta iz stali ili tverdogo splava* [The method of processing of tool steel or hard alloy]. Patent RF, no. 2451108, 2012.

21. Sokolov A.G. *Ustroistvo dlya diffuzionnoi metallizatsii v srede legkoplavkikh zhidkometallicheskikh rastvorov* [A device for the diffusion metallization in the environment of the fusible liquid metal solutions]. Patent RF, no. 2521187, 2014.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 65–79
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-65-79

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние скорости резания металлов на регенерацию вибрационных колебаний инструмента в станках токарной группы

Виктор Лапшин *

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

https://orcid.org/0000-0002-5114-0316, lapshin1917@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:
Поступила: 21 декабря 2019
Рецензирование: 13 января 2020
Принята к печати: 07 февраля 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Нелинейная динамика
Вибрации
Процесс резания
Регенерация колебаний

Финансирование
Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-08-00022.

АННОТАЦИЯ

Введение. Вибрации инструмента, сопровождающие процесс резания, во многом связаны с давно выявленным регенеративным эффектом, который существенно влияет на динамические характеристики процесса обработки металлов резанием, что указывается в многочисленных зарубежных публикациях ведущих европейских специалистов в области металлообработки. В работах некоторых российских ученых, специализирующихся на анализе процессов обработки металлов резанием на металлорежущих станках, рассматривается положение о существовании оптимальной скорости резания, обеспечивающей наилучшее качество обрабатываемой поверхности и наибольшую стойкость инструмента. В связи с этим в статье рассмотрен вопрос вероятной связи этой оптимальной скорости с регенерацией колебаний инструмента при токарной обработке металлов. **Цель работы:** рассматривается возможность оценки влияния регенеративного эффекта на динамику процесса обработки без учета дополнительных влияний на процесс как со стороны станка, так и со стороны самого процесса резания с целью определения существования оптимальных режимов резания. **В работе исследована:** математическая модель, описывающая динамику вибраций инструмента в условиях обработки металлов на станках токарной группы, при этом рассматривается только процесс продольного точения изделия. **Методы исследования:** на основе математического моделирования динамической системы резания рассмотрено три варианта возможного поведения процесса обработки с учетом влияния на регенерацию колебаний инструмента, периода вращения шпинделя с закрепленной в нем деталью. В качестве первого рассматривался нейтральный вариант, при котором этот период не носит связанного с несущей частотой скорости осевых деформаций инструмента. Второй вариант определял оптимальную скорость вращения шпинделя, которая полностью совпадала с несущей частотой скорости осевых деформаций инструмента. Третий вариант показывает наихудший вариант скорости вращения шпинделя, которая делает период его колебаний таким, что при нем влияние регенеративного эффекта максимально. **Результаты и обсуждение.** Приведены результаты моделирования, раскрывающие динамику системы с учетом трех выбранных нами вариантов заданной частоты вращения шпинделя станка. Результаты исследований показали, что даже в условиях самого простого описания сил резания динамика системы носит достаточно сложный характер, на который существенным образом влияет выявленный в работе регенеративный эффект. Численный эксперимент подтверждает предложенную теорию о существовании оптимальной с точки зрения влияния на процесс резания регенерации колебаний инструмента скорости обработки. Полученные результаты лежат в русле известных отечественных работ, посвященных практическому анализу возможности построения оптимальных систем обработки резанием и связывают их с работами ведущих европейских специалистов в области динамики процессов обработки металлов.

Для цитирования: *Лапшин В.П.* Влияние скорости резания металлов на регенерацию вибрационных колебаний инструмента в станках токарной группы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 65–79. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-65-79.

Введение

Современные технологии обработки металлов на металлорежущих станках являются постоянно развивающейся отраслью науки и техники. Так, станки, выпускаемые ведущими мировыми лидерами в области металлообработки, такими, к примеру, как Siemens и Fanuc Co., Ltd., являются одними из самых сложных и

***Адрес для переписки**
Лапшин Виктор Петрович, Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тел.: 8 (900) 122-75-14, **e-mail:**lapshin1917@yandex.ru

дорогостоящих машин, производимых в мире. В металлорежущих станках существенно увеличились производственные возможности, благодаря тому что последние тенденции развития металлообрабатывающего оборудования были направлены на область, связанную с дальнейшим внедрением цифровых систем контроля точности и надежности процесса обработки, что объясняется дальнейшим развитием систем цифрового контроля (датчики) и обработки получаемых от них данных. Сегодня на рынке оборудования диагностики и мониторинга таких аспектов, как состояние обрабатываемой детали (шероховатость поверхности, целостность и точность размеров), обнаружение износа и поломки инструмента, идентификация дребезжания, анализ состояния компонентов станка, представлено большое количество датчиков и методов обработки сигналов. Однако несмотря на это, вибрации инструмента при резании до сих пор являются ограничением для повышения производительности и качества деталей в машиностроении.

Одной из причин появления вибраций инструмента, сопровождающих процесс резания, является влияние на процесс обработки так называемого регенеративного эффекта. Впервые регенерацию колебаний при обработке металлов на металлорежущих станках исследовали *Hahn R.S.* и *Tobias S. A*. [1, 2]. Работы этих авторов являются фундаментальным базисом, лежащим в основе анализа динамики вибраций инструмента при резании в европейской и североамериканской научной публицистике, которая в дальнейшем оценивала влияние регенерации колебаний на нелинейные модели систем резания [3–8]. В работах многих авторов, публикующихся в европейской и североамериканской печати, отмечается возможность установления хаотического характера вибраций инструмента при регенерации колебаний [9–12]. В целом удалось установить, что главным фактором, влияющим на регенеративный эффект, является так называемая временная задержка “time delay” [13–17], именно она определяет динамику процесса. Во всех выше указанных работах авторами рассматривался вариант либо скалярной системы, либо (в очень редких случаях) вариант системы с двумя степенями свободы. Отметим, что вибрации реального инструмента происходят в реальном трехмерном пространстве, и, как следствие, модель силовой реакции зависит именно от трехмерного движения инструмента. В нашей стране также занимаются вопросами описания и анализа нелинейной регенеративной динамики колебаний (вибраций) инструмента при обработке металлов резанием [18–24], однако в этих работах вопросы оценки влияния резания по «следу» на динамику вибраций инструмента рассматриваются косвенно, за исключением работ [17, 22]. Все указанные работы за исключением работ, исследующих общие подходы к описанию регенерации колебаний при резании [1–5, 7, 9, 10, 12–14], в основном посвящены вопросам регенерации колебаний при фрезеровании [6, 8, 11, 15, 21, 22] или сверлении [18, 19]. Для придания таким моделям свойств, обеспечивающих сложную динамику процесса обработки, как правило, а также ограничений на рост амплитуды колебаний, в них дополнительно вводят некоторые нелинейности, например как в уравнении Дюффинга [11–15], что сложно объяснить с точки зрения описания реального процесса обработки. При моделировании таких уравнений величина запаздывания, в реальном процессе резания представленная, как правило, скоростью вращения шпинделя, не связана с параметрами уравнения в вариациях и представляется некоторой внешней переменной. В случае, например, связанного резания, когда от скорости вращения шпинделя зависит как скорость резания, так и величина подачи (подача на оборот), такая вариация величины запаздывания должна приводить к параметрической коррекции математической модели, что зачастую не делается.

В случаях описания регенеративных эффектов при точении металлов речь в основном идет об ортогональном резании, и здесь также рассматривается либо скалярная одномассовая модель, либо двухмассовая с двумя степенями свободы [16, 17]. Такое упрощение не позволяет учитывать влияние на динамику вибраций сложной нелинейной, связанной через силу резания природы деформационных движений инструмента. Однако в работах научной школы В.Л. Заковоротного [22–25], посвященных анализу нелинейной динамики деформаций инструмента в условиях связанности через силовую реакцию этого деформационного движения с элементами резания системы ЧПУ станка, рассматривается

именно вариант векторного представления такого движения. В этом случае динамические эффекты, возникающие при моделировании, более точно отражают природу взаимодействия подсистемы деформационных движений. Именно этот подход в самом упрощенном представлении был использован нами при синтезе математической модели.

Цель работы. В изданиях российских специалистов в области металлообработки помимо всего прочего отмечен факт существования некоторого наилучшего режима обработки, связанного со скоростью резания [25–28]. Так, в работе А.Д. Макарова [28, с. 67] приводится следующее положение: «Оптимальным скоростям резания при различных комбинациях подачи и глубины резания соответствует постоянная температура». Здесь, по нашему мнению, важно отметить, что автор экспериментально подтверждает наличие оптимальной скорости обработки. Опираясь на это утверждение, а также на то, что в работах европейских специалистов в динамике металлообработки указывается крайняя важность влияния на обработку регенеративного эффекта, поставим цель исследовать доказательство связи оптимальной скорости резания с эффектом регенерации колебаний. Интерес представляет оценка такой связи при условии моделирования именно связанного трехмерного колебательного движения инструмента в модели, основанной на реальном описании нелинейного характера формирования силы резания. Задачами исследования являются: синтез математической модели, отражающей российский взгляд на динамику обработки металлов резанием, проведение численного эксперимента с целью выявления возможных оптимальных с точки зрения влияния скорости на регенерацию вибраций инструмента режимов обработки и сопоставление полученных результатов с принятым в российской периодике подходом к установлению оптимальной скорости резания.

Методика исследований

Для случая продольного точения реальные деформации инструмента относительно обрабатываемой детали можно разложить минимум вдоль трех осей [20, 22–26].

Как видно из рис. 1, в схеме принято разложение деформаций на три основные оси: ось x – осевое направление деформаций, мм; ось y – радиальное направление деформаций, мм и ось z – тангенциальное направление деформаций, мм. Вдоль этих же осей разложена силовая реакция со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента (F_x, F_y, F_z, Н), V_x и V_z, мм/с, скорости подачи и резания соответственно, ω – угловая скорость вращения шпинделя, рад/с.

В дальнейшем в работе ограничимся случаем, связанным с токарной обработкой недеформируемой заготовки. Тогда уравнение динамики примет следующий вид:

$$m\frac{d^2\Psi}{dt^2} + h\frac{d\Psi}{dt} + c\Psi = F\left(\Psi, t_P^{(0)}, S_P^{(0)}\right), \quad (1)$$

где m, h, c – симметричные, положительно определенные матрицы, размерностью $3 \otimes 3$; $\Psi = \{X, Y, Z\}^{\mathrm{T}} \in \Re^{(3)}$ – вектор упругих деформаций инструмента; $F\left(\Psi, t_P^{(0)}, S_P^{(0)}\right) = \{F_x, F_y, F_z\}^{\mathrm{T}} \in \Re^{(3)}$ – вектор-функция сил, действующих на инструмент (реакция на формообразующие движения инструмента со стороны процесса резания); $t_P^{(0)}$, $S_P^{(0)}$ – глубина и оборотная подача, заданные программой обработки.

Соотношения между составляющими силы F_x, F_y, F_z зависят от многих факторов, таких, к

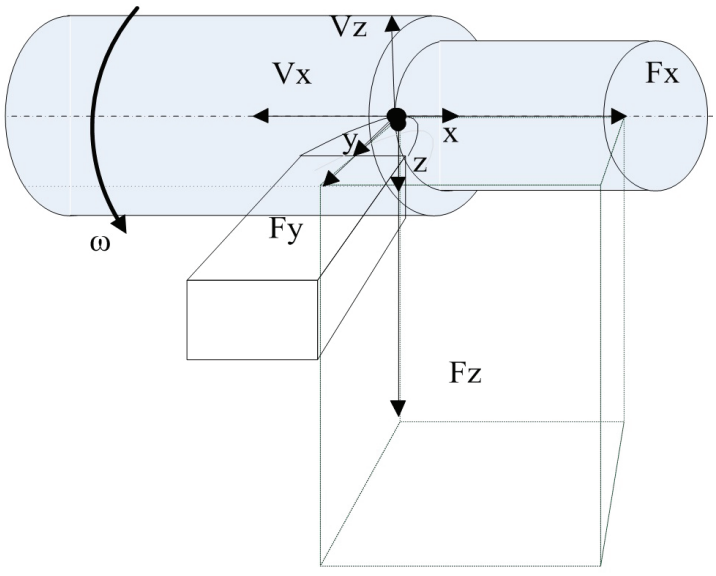


Рис. 1. Ориентация осей деформаций и сил

Fig. 1. Orientation of the axes of the deformations and forces

примеру, как геометрия резца, степень износа резца и т. д. [25]. Так, в работе [25] при обработке с острым резцом с основными углами заточки инструмента $\gamma = 15°$, $\varphi = 45°$ и $\lambda = 0°$ соотношение между составляющими в среднем равно:

$$F_x, F_y, F_z = (0.3...0.4),\ (0.4...0.5). \qquad (2)$$

Таким образом, при разложении сил реакции вдоль осей деформации инструмента осевая составляющая силы реакции будет равна 30…40 % от тангенциальной составляющей, а радиальная составляющая 40…50 %. Для формирования непротиворечивой модели силы резания рассмотрим некоторые подходы к описанию усилия резания. Так, в работе [26] представлена формула К.А. Зворыкина, которая в нашей интерпретации может быть представлена так:

$$F_z = \rho t_p S \frac{\sin\left(2\Theta + (90 - \gamma)\right)\cos\Theta_1}{\cos\Theta\cos(90 - \varphi)}, \qquad (3)$$

где Θ и Θ_1 – углы трения на контактных площадках инструмента и в плоскости сдвига соответственно; ρ – предел прочности материала на разрыв; t_p – глубина срезаемого слоя материла; S – величина подачи на оборот детали.

Усилие резания, по Н.Н. Зореву, рассчитывается по следующей теоретической зависимости [27]:

$$F_z = \rho t_p S \frac{\cos\omega}{\cos(\varphi + \omega)\sin\varphi}. \qquad (4)$$

Анализ выражений (3), (4) позволяет сделать некоторое обобщение в виде следующей гипотезы:

$$F_i = \rho t_p S \chi_i\ , \qquad (5)$$

где χ_i – некоторый коэффициент разложения общего вектора сил реакции на *i*-ю ось деформации инструмента. При расчете этих коэффициентов нужно учесть пример, приведенный в выражении (2). Надо отметить, что такой подход широко применяется в рамках научной школы В.Л. Заковоротного [22–25].

На введенные коэффициенты χ_i наложим нормировку в виде

$$\sqrt{{\chi_1}^2 + {\chi_3}^2 + {\chi_3}^2} = 1. \qquad (6)$$

Глубина обработки t_p также будет зависеть от деформаций инструмента и обрабатываемой детали:

$$t_p = t_{p0} - y, \qquad (7)$$

где t_{p0} – технологически заданная глубина обработки без учета деформаций инструмента и детали (определяется программой ЧПУ).

Величина подачи на оборот S может быть представлена в виде следующего интеграла [22–25]:

$$S = \int_{t-T}^{t} \left(V_x - \frac{dx}{dt}\right) dt, \qquad (8)$$

где V_x – скорость подачи; T – период вращения детали, который, в свою очередь, может быть определен следующим образом:

$$T = \frac{r}{V_z - \dfrac{dz}{dt}}, \qquad (9)$$

где r – радиус обрабатываемой детали.

Выражение (8) для дальнейшего анализа удобно представить в виде

$$S = V_x T - \int_{t-T}^{t} \frac{dx}{dt} dt =$$

$$= V_x T - x(t) + x(t - T). \qquad (10)$$

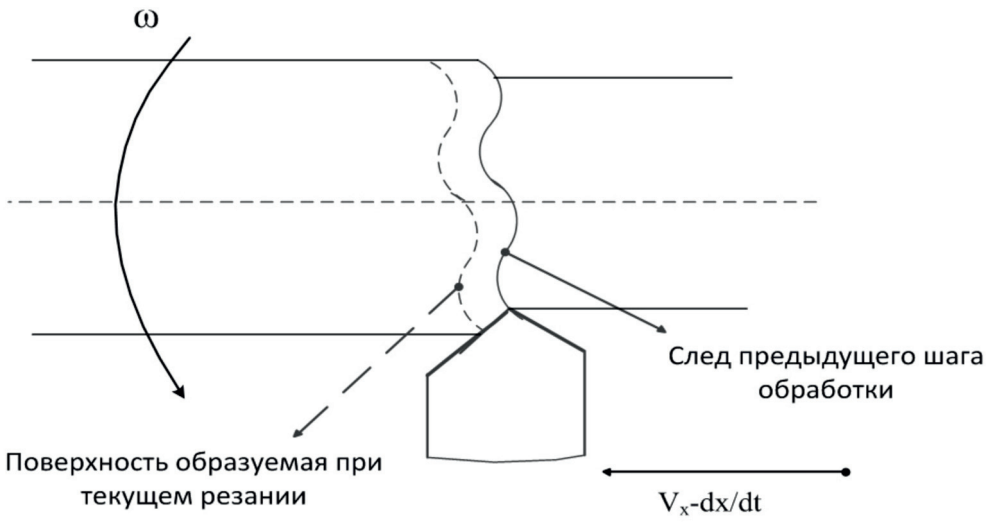
Именно в выражении (9) с математической точки зрения и есть источник регенерации колебаний. Однако прежде чем проанализировать это выражение, остановимся на некоторых наглядных пояснениях, уточняющих природу регенерации колебаний при точении металлов.

В самом общем случае регенеративный эффект можно обосновать тем, что при резании в условиях повторного внедрения инструмента в обрабатываемую деталь на текущую обработку начинают влиять следы предыдущей обработки, т. е. волны, оставленные инструментом на предыдущем шаге резания, как бы регенерируются во время каждого последующего прохода инструмента. Это явление вызывает изменение толщины стружки и, следовательно, изменение силы резания и за счет этого увеличивается амплитуда вибраций режущего инструмента. Для наглядности рассмотрим два возможных вари-

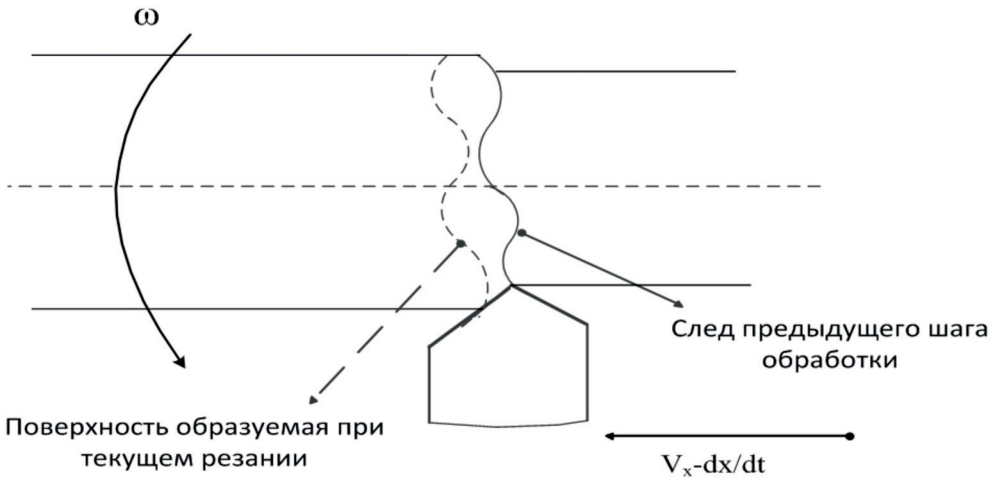
анта связанного точения (глубина и подача постоянные), оба этих варианта представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при обработке металлов точением возможны варианты, когда подача инструмента в обрабатываемую деталь близка к постоянному значению (рис. 2, *а*), а возможны варианты, когда реальная подача (с учетом деформации инструмента в осевом направлении) существенным образом изменяется, колеблется (рис. 2, *б*), и именно в этом случае сам процесс резания, вернее, силовая реакция (выражения (5), (10)), осуществляет генерацию колебаний инструмента. Для этого случая (рис. 2, *б*) при условии того, что левая линейная часть уравнения (1) имеет хорошее устойчивое решение (коэффициенты матрицы h велики), будут характерны незатухающие колебания с частотами, обусловленными регенеративным эффектом. В случае добротности системы (1) (коэффициенты матрицы h малы) процесс деформационных движений инструмента должен приобрести неустойчивый вид.

Вернемся к анализу выражения (10). Здесь при объяснении регенеративного эффекта самовозбуждения системы резания важна



а



б

Рис. 2. Пример регенерации колебаний:

а – нет регенеративного эффекта; *б* – регенеративный эффект близок к максимальному

Fig. 2. Example of oscillation regeneration:

а – no regenerative effect; *б* – regenerative effect is close to maximum

вторая составляющая первой части этого выражения, т. е.

$$\Delta S = \int_{t-T}^{t} \frac{dx}{dt} dt . \qquad (11)$$

Предположим, что скорость деформаций инструмента в осевом направлении имеет простую гармоническую форму, к примеру, $\frac{dx}{dt} = a \sin(\omega_x t)$, где a – амплитуда; ω_x – частота этих колебаний. Тогда под $\frac{dx}{dt}$ площадь, определяемая интегралом (11), будет зависеть от соотношения частот ω (частота вращения шпинделя) и ω_x. В случае совпадения этих частот, т. е. совпадений периода колебаний $\frac{dx}{dt}$ и периода вращения шпинделя, площадь, определяемая интегралом (11), будет равна нулю, т. е. этот интеграл посчитает площадь под первой полуволной колебаний и вычтет из нее площадь под второй полуволной. Отметим, что эти рассуждения соответствуют тому, что изображено на рис. 2, *а*. Во всех остальных случаях ΔS будет отлична от нуля и оператор (11) будет генератором колебаний. Здесь самый большой интерес представляет случай, представленный на рис. 2, *б*, т. е. вариант максимально возможных колебаний подачи. Анализ выражения (11) с учетом предположения о простой гармонической форме сигнала $\frac{dx}{dt}$ показывает, что максимум ΔS будет при выполнении условия $\omega = 2\omega_x$, т. е. в случае, когда период вращения шпинделя равен половине периода колебаний $\frac{dx}{dt}$. Именно в этом случае регенерация колебаний в системе резания будет максимальной.

Отметим, что скорость вибраций инструмента в осевом направлении в реальности носит достаточно сложный характер, обусловленный нелинейной природой динамической связи, формируемой в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали (выражение (5)). Следовательно, напрямую применить приведенные выше рассуждения достаточно сложно, однако в целом эти рассуждения справедливы и на основании их можно разработать программу численного эксперимента с моделью, представленной выражениями (5)–(10).

Результаты исследований

Перед приведением результатов моделирования оговорим параметры модели, представленной в выражении (1), а также условия эксперимента. Что касается условий эксперимента, то сконцентрируем внимание на оценке динамики системы, описываемой выражением (1) в трех точках, отличающихся друг от друга частотой вращения шпинделя. При этом примем, что речь идет о точении на станке, имеющем возможность широкого регулирования скорости обработки, но с одной и той же глубиной и оборотной подачей.

Первая точка эксперимента связана с оценкой динамики системы резания при условии простого несовпадения периода вращения шпинделя с периодом колебаний скорости вибраций в осевом направлении $\left(\frac{dx}{dt}\right)$, т. е. частота вращения выбирается произвольным образом. Во всех экспериментах примем, что система, описывающая деформационные движения инструмента, характеризуется следующими параметрами:

$$m = \begin{bmatrix} 0{,}0065 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}0065 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0065 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{мм};$$

$$h = \begin{bmatrix} 0{,}844 & 0{,}39 & 0{,}37 \\ 0{,}39 & 0{,}77 & 0{,}36 \\ 0{,}37 & 0{,}36 & 0{,}75 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{с/мм};$$

$$c = \begin{bmatrix} 1390 & 190 & 165 \\ 190 & 795 & 150 \\ 165 & 150 & 970 \end{bmatrix} \text{ кг/мм}.$$

Коэффициенты ориентации: $\chi_x = 0{,}3369$, $\chi_2 = 0{,}48$, $\chi_3 = 0{,}81$. Технологические режимы: глубина $t_P = 2$ мм, подача $S = 0{,}1$ мм, частота вращения шпинделя $n = 1000$ об/мин, $\rho = 400$ кг/мм^2, радиус обрабатываемой детали $R = 50$ мм. Собственные частоты подсистемы инструмента: $\Omega_{0,x} = 460$ с$^{-1}$, $\Omega_{0,y} = 350$ с$^{-1}$, $\Omega_{0,z} = 398$ с$^{-1}$.

Результаты моделирования системы деформационных колебаний инструмента в виде временны́х характеристик координат деформации и соответствующих им фазовым траекториям представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, в системе деформационных движений инструмента наблюдаются сгенерированные при врезании инструмента в обрабатываемую деталь виброколебания, стягивающиеся после каждого оборота детали к некоторому малому предельному циклу (см. рис. 3, *г*, *д*, *е*). Из рисунка видно, что за время эксперимента деталь (шпиндель) совершает около пяти оборотов, на каждом из которых в связи с существованием следа от предыдущего генерируются новые колебания, т. е. здесь напрямую наблюдается регенеративный эффект в возбуждении в системе колебаний. Для оценки правильности подхода, озвученного нами выше, построим спектр мощности сигнала $\left(\frac{dx}{dt}\right)$ (рис. 4).

Как показано на рис. 4, основной частотой для виброколебаний инструмента в осевом направлении выступает частота $\Omega_{x,0} = 28,1\ \text{с}^{-1}$ с двумя основными субчастотами: левой $\Omega_{x,1} = 27,6\ \text{с}^{-1}$ и правой $\Omega_{x,1} = 27,6\ \text{с}^{-1}$, при этом расстояние

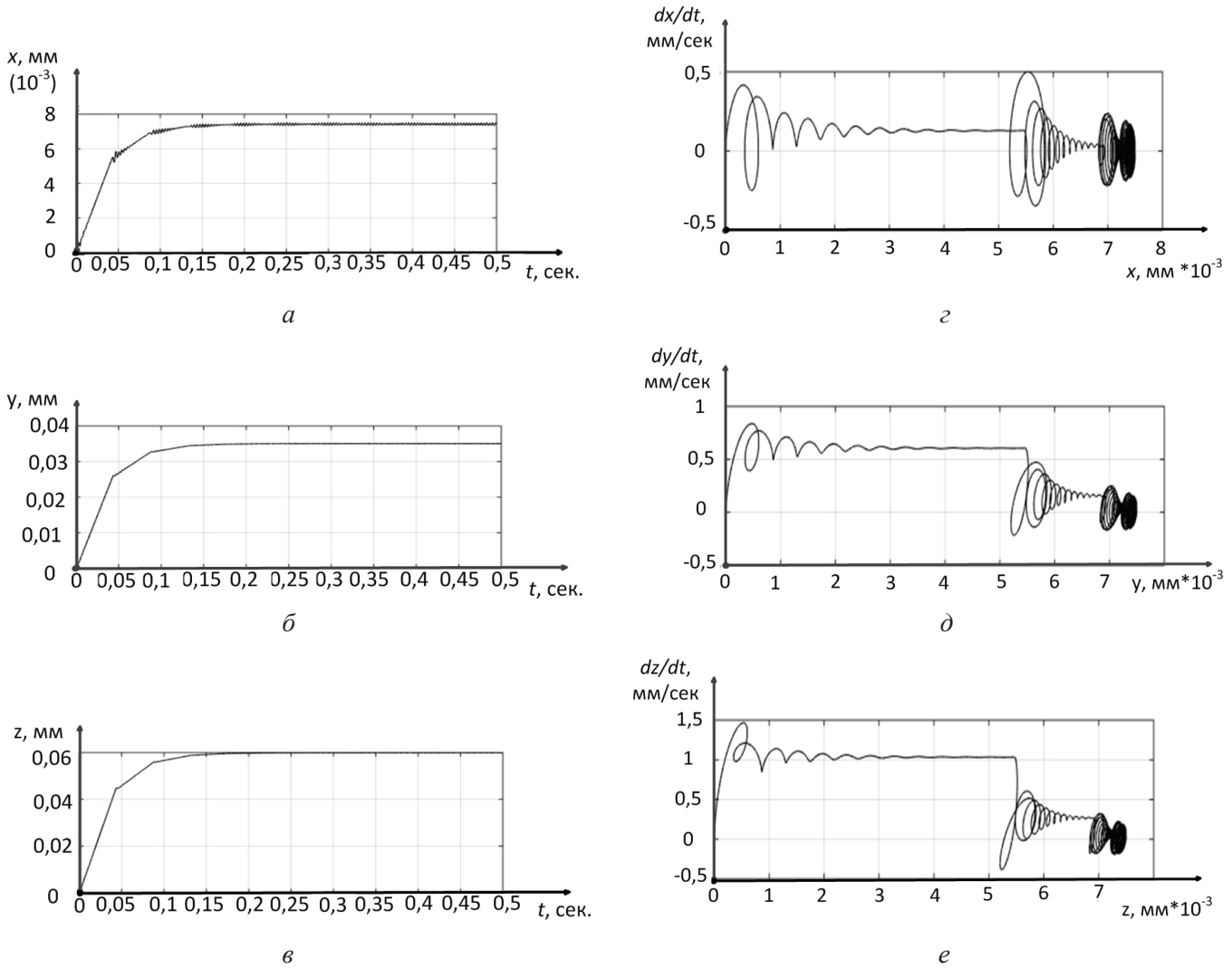


Рис. 3. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории:

а, *г* – по координате *x*; *б*, *д* – по координате *y*; *в*, *е* – по координате *z*

Fig. 3. Transient characteristics of the coordinates of the deformation movement of the tool and the corresponding phase trajectories:

а, *г* – at the *x* coordinate; *б*, *д* – at the *y* coordinate; *в*, *е* – at the *z* coordinate

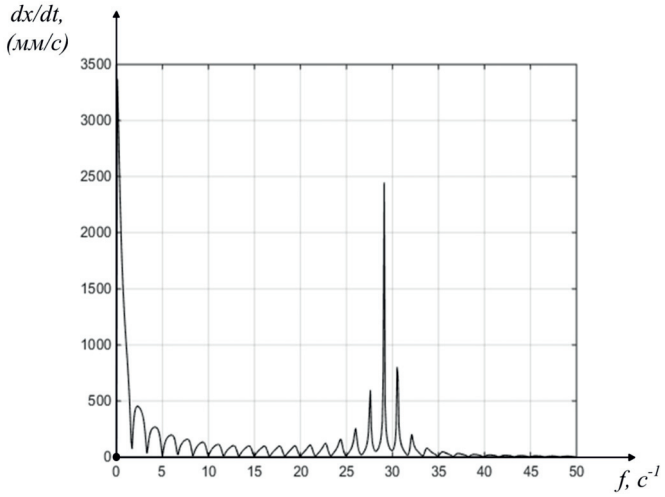


Рис. 4. Спектр мощности сигнала *dx/dt* для *n* =1000 об/мин
Fig. 4. Signal power Spectrum *dx/dt* for *n* = 1000 rpm

между несущей частотой и этими двумя субчастотами составляет примерно 1,4 $с^{-1}$.

Согласно выдвинутой нами выше гипотезе, если подобрать частоту вращения шпинделя, равную основной частоте колебаний скорости деформаций в осевом направлении, то удастся минимизировать влияние регенеративного эффекта на вибрации инструмента. Здесь надо оговорить тот факт, что исследуемая система нелинейна. Изменение частоты вращения шпинделя в силу выражения (8) приведет к изменению силы резания (из-за изменения площади срезаемого слоя) и в результате к изменению амплитуды колебаний, что, в свою очередь, повлияет (в силу нелинейности системы уравнений (1) [29]) на основную частоту колебаний $\frac{dx}{dt}$. Следовательно частота вращения шпинделя, компенсирующая эффект регенерации колебаний, будет отлична от определенного на рис. 4 значения. Результаты моделирования системы деформационных движений инструмента с подобранной частотой вращения шпинделя, компенсирующей регенеративный эффект, представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, вибрационный процесс в целом стал более устойчив, однако полностью исключить регенерацию колебаний здесь не удалось. Для того чтобы понять, почему это произошло, рассмотрим спектр мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$, который приведен на рис. 6.

Как показывает рис. 6, в результате изменения частоты вращения шпинделя здесь удалось заглушить несущую частоту колебаний, однако существенно выросли субчастоты: левая $\Omega_{x,1} = 28,01\ с^{-1}$ и правая $\Omega_{x,2} = 30,05\ с^{-1}$, при этом расстояние между ними составляет примерно 2,4 $с^{-1}$, которые и стали фактором, обусловившим регенерацию колебаний.

Самый интересный случай в силу гипотезы, озвученной нами ранее, – это когда период вращения шпинделя составляет ровно половину от периода, соответствующего основной несущей частоте колебаний скорости деформаций инструмента в осевом направлении (рис. 7).

Как показано на рис. 7, колебания инструмента начинают носить незатухающий характер, что существенно отличает их от случаев, представленных нами ранее. Сама форма колебаний, исходя из анализа фазовых траекторий (см. рис. 7, *г*, *д*, *е*), стягивается к некоторому предельному циклу. Это значит, что если в предыдущих случаях эти колебания, затухая, стремились стянуться на фазовой части, изображенной на рисунках, к некоторой константе, то здесь наблюдается формирование повторяющейся структуры периодических движений. Для более подробного анализа удобно рассмотреть спектр мощности осевой скорости деформационных движений инструмента (рис. 8).

Как видно из рис. 8, мощность колебаний осевой скорости деформационных движений инструмента на основной частоте существенно выросла как по сравнению с мощностью представленной на рис. 4, так и с мощностью, приведенной на рис. 6. При этом субчастоты основной частоты оказались сильно ослаблены, т. е. почти вся энергия сигнала была перенаправлена в область несущей частоты. Этим и обусловлены формируемые фазовые траектории, которые показывают существенное упрощение формы периодического сигнала колебаний.

Обсуждение

Перед тем, как сделать анализ полученных результатов, мы хотели бы заострить внимание на том факте, что использованный нами подход к описанию сил резания (см. выражение (5)), несмотря на нелинейность описания, носит самый простейший характер. Это значит, что здесь нет

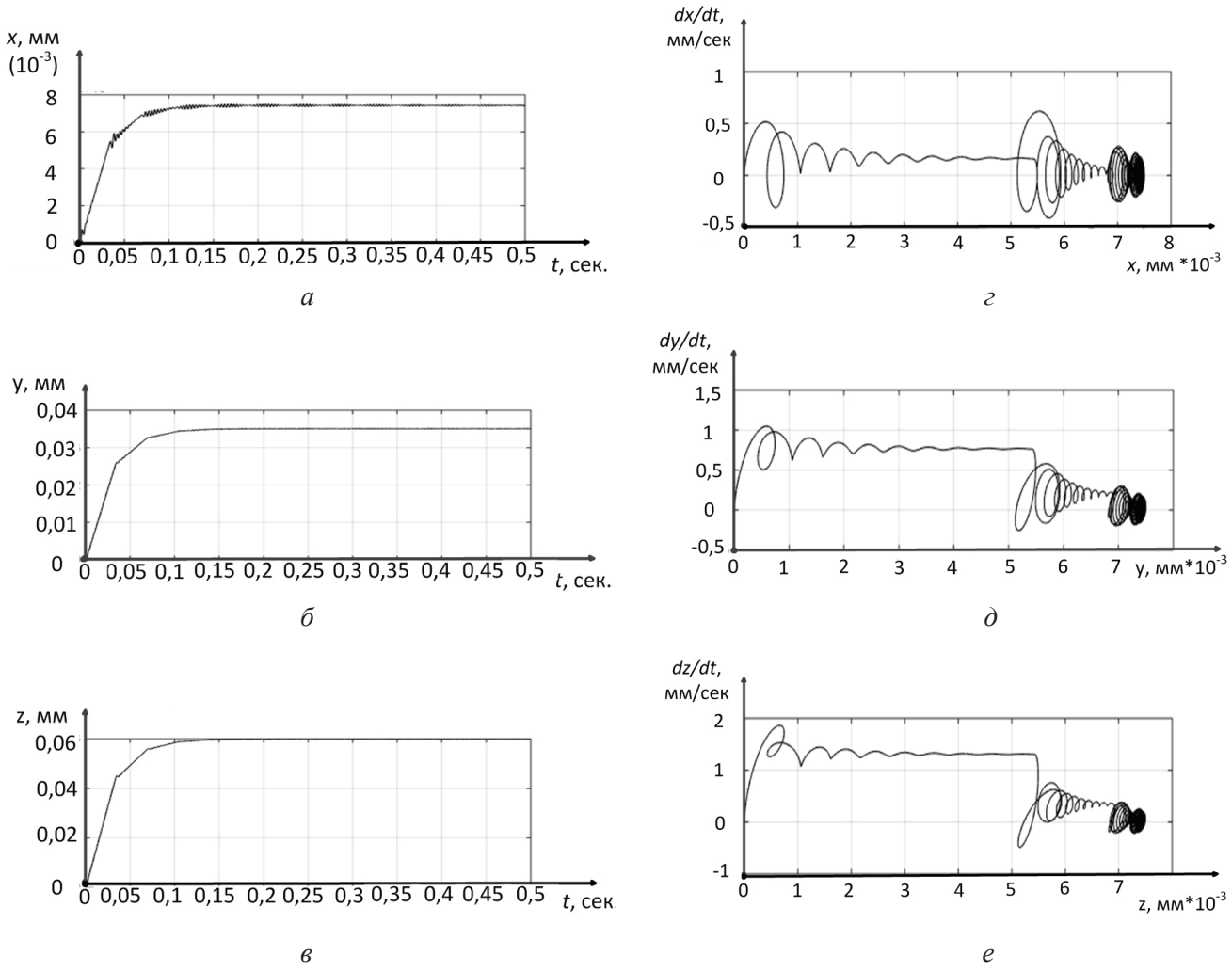


Рис. 5. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории (n = 1775 об/мин):

а, *г* – по координате *x*; *б*, *д* – по координате *y*; *в*, *е* – по координате *z*

Fig. 5. Transient characteristics of the coordinates of the deformation movement of the tool and the corresponding phase trajectories (n = 1775 rpm):

а, *г* – at the *x* coordinate; *б*, *д* – at the *y* coordinate; *в*, *е* – at the *z* coordinate

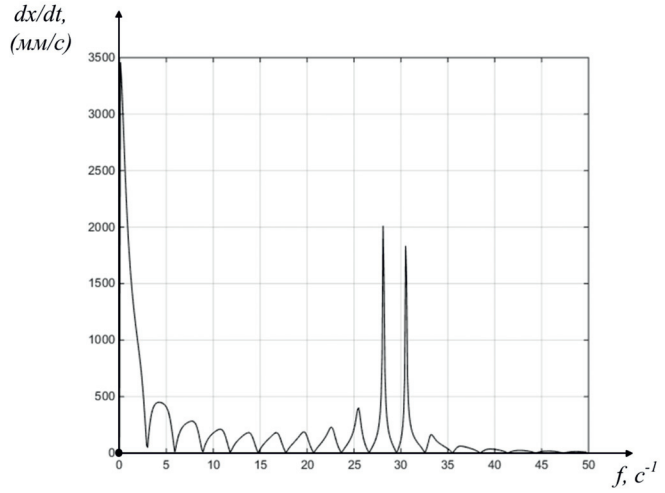


Рис. 6. Спектр мощности сигнала *dx/dt* для n = 1775

Fig. 6. Signal power Spectrum *dx/dt* for n = 1775

учета падающей характеристики силы резания от скорости резания, а также отсутствует влияние на динамику процесса резания температуры в зоне резания и влияние изменяемой по мере продольного точения жесткости детали и т. д. Все это должно усложнить как модель, так и форму колебаний, что может существенным образом повлиять на результаты исследований. В левой части модели (см. выражение (1)) отсутствуют дополнительно введенные нелинейности типа уравнения Дюфинга, что достаточно часто вводят в свои модели современные европейские исследователи [11–17] и обеспечивают тем самым хаотическую динамику процесса резания. Однако, по нашему мнению, сам

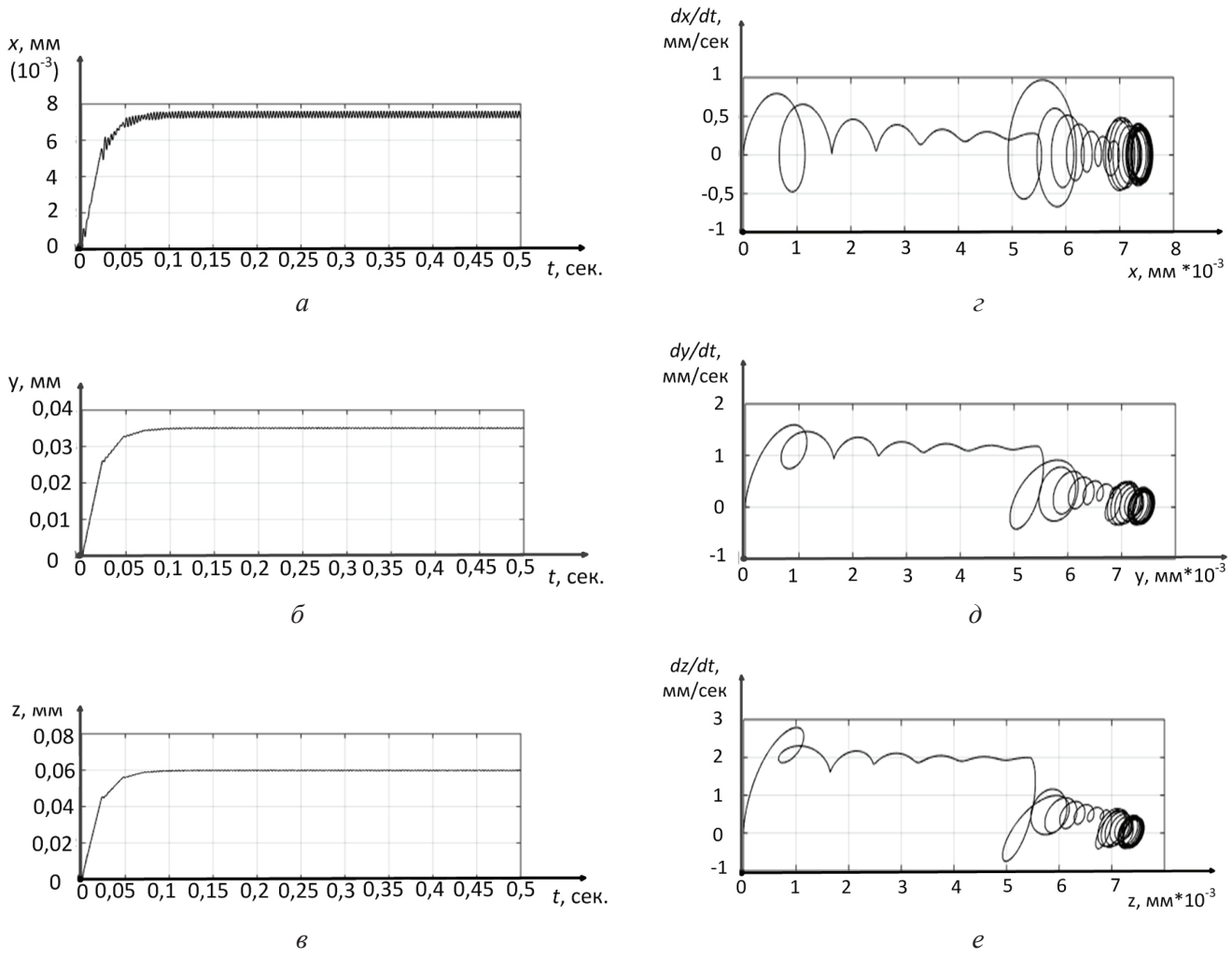


Рис. 7. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории (n = 3222 об/мин):

а, *г* – по координате *x*; *б*, *д* – по координате *y*; *в*, *е* – по координате *z*

Fig. 7. Transient characteristics of the coordinates of the deformation movement of the tool and the corresponding phase trajectories (n = 3222 rpm):

а, *г* – at the *x* coordinate; *б*, *д* – at the *y* coordinate; *в*, *е* – at the *z* coordinate

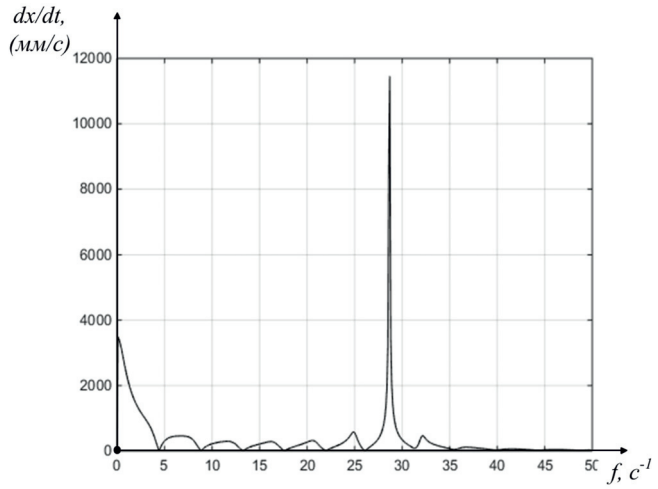


Рис. 8. Спектр мощности сигнала *dx/dt* для n = 3222

Fig. 8. Signal power Spectrum *dx/dt* for n = 3222

подход к оценке регенеративного влияния скорости резания, определяемой при токарной обработке частотой вращения шпинделя с закрепленной в нем обрабатываемой деталью, на вибрационную активность инструмента вполне оправдан. Оценка влияния регенеративного эффекта на динамику резания при условии реализации дополнительных условиях формирования силовой реакции будет рассмотрена нами в следующих публикациях.

В настоящей работе нет полной реализации описанного нами во второй части статьи подхода к усилению или ослаблению регенеративного эффекта на основе подстройки периода вращения шпинделя к периоду колебаний интегрируемой в выражении (11) функции *dx/dt*,

однако, возможен вариант подбора оптимальной или квазиоптимальной скорости резания. Здесь под квазиоптимальностью мы понимаем возможность существенного снижения амплитуды колебаний деформационных инструментов, которые во многом и определяют качество обработанной поверхности. Отметим, что это позволяет нам говорить о возможной связи известного из работ отечественных авторов положения о существовании оптимальной скорости резания с режимом обработки, обеспечивающим минимум влияния регенеративного эффекта на динамику резания.

Заключение

Таким образом, с помощью достаточно простой векторной модели, описывающей динамику процесса обработки в принятых у отечественных специалистов терминах силовой реакции со стороны процесса резания, нам удалось показать влияние регенеративного эффекта на динамику резания и сблизить позиции по выбору оптимальных режимов обработки между принятыми в Европе и России подходами.

Список литературы

1. *Hahn R.S.* On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation // Transactions of American Society of Mechanical Engineers. – 1954. – Vol. 76. – P. 356–260.

2. *Tobias S.A., Fishwick W.* Theory of regenerative machine tool chatter // The Engineer. – 1958. – Vol. 205, N 7. – P. 199–203.

3. *Merritt H.E.* Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1 // Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87, N 4. – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.

4. *Hanna N.H., Tobias S.A.* A theory of nonlinear regenerative chatter // Journal of Engineering for Industry. – 1974. – Vol. 96, N 1. – P. 247–255.

5. *Tlusty I., Ismail F.* Basic non-linearity in machining chatter // CIRP Annals. – 1981. – Vol. 30. – P. 299–304. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.

6. *Altintaş Y., Budak E.* Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44, N 1. – P. 357–362. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.

7. *Insperger T., Stépán G.* Stability of the milling process // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2000. – Vol. 44, N 1. – P. 47–57.

8. *Wiercigroch M., Budak E.* Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – N 359. – P. 663–693. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.

9. *Grabec I.* Chaos generated by the cutting process // Physics Letters A. – 1986. – Vol. 117, N 8. – P. 384–386. – DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.

10. *Balachandran B.* Nonlinear dynamics of milling process // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359. – P. 793–819.

11. *Stepan G.* Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359. – P. 739–757. – DOI: 10.1098/rsta.2000.07537.

12. *Litak G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // Chaos Solitons and Fractals. – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

13. *Namachchivaya S., Beddini.* Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter // Journal of Nonlinear Science. – 2003. – Vol. 13, N 3. – P. 265–288. – DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.

14. *Wahi P., Chatterjee A.* Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales // Nonlinear Dynamics. – 2005. – Vol. 40, N 4. – P. 323–338.

15. *Stépán G., Insperger 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.

16. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis / H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45, N 8. – P. 1050–1066. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

17. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gouskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2002. – Vol. 7, N 4. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.

18. *Гуськов А.М., Воронов С.А., Квашнин А.С.* Влияние крутильных колебаний на процесс вибросверления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2007. – № 1 (66). – С. 3–19.

19. *Васин С.А., Васин Л.А.* Синергетический подход к описанию природы возникновения и развития автоколебаний при точении // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 11–16.

20. *Воронин А.А.* Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов // Станки и инструменты. – 1960. – № 11. – С. 15–18.

21. *Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Губанова А.А.* Определение оптимальных траекторий при обработке с учетом эволюции процесса резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – Т. 14, № 3 (78). – DOI: 10.12737/5715.

22. *Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S.* Assessing the regenerative effect impact on the dynamics of deformation movements of the tool during turning // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 68–73. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.439.

23. 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.

24. *Lapshin V.P., Turkin I.A.* Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, N 10. – P. 795–797. – DOI: 10.3103/S1068798X15100111.

25. *Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Климов М.М.* Обработка материалов резанием. – Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 418 с. – ISBN 978-5-7890-0413-X.

26. *Вульф А.М.* Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.

27. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.

28. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

29. *Попов Е.П., Пальтов И.П.* Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. – М.: Физматгиз, 1960. – 792 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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 65–79
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-65-79

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

The Influence of the Cutting Speed of Metals on the Regeneration of the Vibratory Oscillations of the Tool in Machines of the Turning Group

Victor Lapshin *

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

https://orcid.org/0000-0002-5114-0316, lapshin1917@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 21 December 2019
Revised: 13 January 2020
Accepted: 07 February 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Nonlinear dynamics
Vibrations
Cutting process
Oscillation regeneration

Funding
The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-08-00022.

ABSTRACT

Introduction. Tool vibrations accompanying the cutting process are largely related to the long-established regenerative effect, which significantly affects the dynamic characteristics of the metal cutting process, which is indicated in numerous foreign publications of leading European specialists in the field of Metalworking. In the works of some Russian scientists specializing in the analysis of metal cutting processes on metal-cutting machines, the position of the existence of an optimal cutting speed that provides the best quality of the processed surface and the greatest tool life is considered. Therefore, the paper considers the question of the probable connection of this optimal speed with the regeneration of tool vibrations during metal turning. **Objective**: the possibility of assessing the influence of the regenerative effect on the dynamics of the processing process is considered, without taking into account additional influences on the process, both from the machine side and from the cutting process itself, in order to determine the existence of optimal cutting modes. **The study investigated**: a mathematical model describing the dynamics of tool vibrations in the conditions of metal processing on machines of the turning group, while only the case of longitudinal turning of the product is considered. **Research methods**: on the basis of mathematical modeling of the dynamic cutting system, three variants of the possible behavior of the processing process are considered, taking into account the influence on the regeneration of tool vibrations, the period of rotation of the spindle with the part fixed in it. As the first case, a neutral variant in which this period is not associated with the carrier frequency of the speed of axial deformations of the tool is considered. The second option determined the optimal speed of rotation of the spindle, which completely coincided with the carrier frequency of the speed of axial deformations of the tool. The third option shows the worst-case version of the spindle rotation speed, which makes the spindle oscillation period such that the regenerative effect is maximized. **Results and discussion**. The results of modeling are presented, revealing the dynamics of the system, taking into account the three options selected for the specified spindle speed of the machine. The results of research show that even in the simplest description of cutting forces, the dynamics of the system is quite complex, which is significantly affected by the regenerative effect revealed in the work. The numerical experiment confirms the theory proposed in the paper about the existence of an optimal processing speed, in terms of the influence of tool vibration regeneration on the cutting process. The results obtained are in line with well-known domestic works devoted to the practical analysis of the possibility of building optimal cutting systems and link them with the work of leading European experts in the field of dynamics of metal processing processes.

For citation: Lapshin V.P. The Influence of the Cutting Speed of Metals on the Regeneration of the Vibratory Oscillations of the Tool in Machines of the Turning Group. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 65–79. DOI:10.17212/1994-6309-2020-22.1-65-79. (In Russian).

References

1. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation. *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 1954, vol. 76, pp. 356–260.

2. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205, no. 7, pp. 199–203.

*** Corresponding author**
Lapshin Viktor P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Don State Technical University,
1 Gagarin square,
344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
Tel.: 8 (900) 122-75-14, **e-mail:** lapshin1917@yandex.ru

3. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87, no. 4, pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.

4. Hanna N.H., Tobias S.A. A theory of nonlinear regenerative chatter. *Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96, no. 1, pp. 247–255.

5. Tlusty I., Ismail F. Basic non-linearity in Machining Chatter. *CIRP Annals*, 1981, vol. 30, pp. 299–304. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.

6. Altintaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*, 1995, vol. 44, no. 1, pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.

7. Insperger T., Stépán G. Stability of the milling process. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2000, vol. 44, no. 1, pp. 47–57.

8. Wiercigroch M., Budak E. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, no. 359, pp. 663–693. DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.

9. Grabec I. Chaos generated by the cutting process. *Physics Letters A*, 1986, vol. 117, no. 8, pp. 384–386. DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.

10. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359, pp. 793–819.

11. Stepan G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359, pp. 739–757. DOI: 10.1098/rsta.2000.07537.

12. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Solitons and Fractals*, 2002, vol. 13, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

13. Namachchivaya S., Beddini. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Nonlinear Science*, 2003, vol. 13, no. 3, pp. 265–288. DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.

14. Wahi P., Chatterjee A. Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales. *Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 40, no. 4, pp. 323–338.

15. Stépán G., Insperger 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.

16. Moradi H., Bakhtiari-Nejad F., Movahhedy M.R., Ahmadian M.T. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, vol. 45, no. 8, pp. 1050–1066. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

17. Gouskov 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, no. 4, pp. 207–221. DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.

18. Gouskov A.M., Voronov S.A., Kvashnin A.S. Vliyanie krutil'nykh kolebanii na protsess vibrosverleniya [Influence of torsion vibrations on process of vibration-drilling]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2007, no. 1 (66), pp. 3–19.

19. Vasin S.A., Vasin L.A. Sinergeticheskii podkhod k opisaniyu prirody vozniknoveniya i razvitiya avtokolebanii pri tochenii [Synergetic approach to describing the nature and development of self-oscillations in turning]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2012, no. 1, pp. 11–16.

20. Voronin A.A. Vliyanie ul'trazvukovykh kolebanii na protsess rezaniya zharoprochnykh splavov [Influence of the ultrasound oscillations on the cutting process of the high-temperature alloy]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1960, no. 11, pp. 15–18.

21. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Gubanova A.A. Opredelenie optimal'nykh traektorii pri obrabotke s uchetom evolyutsii protsessa rezaniya [Determination of optimal trajectories during processing taking into account the evolution of the cutting process]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2014, vol. 14, no. 3 (78). DOI: 10.12737/5715.

22. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Assessing the regenerative effect impact on the dynamics of deformation movements of the tool during turning. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 68–73. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.439.

23. 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.

24. Lapshin V.P., Turkin I.A. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 10, pp. 795–797. DOI: 10.3103/S1068798X15100111.

25. Ryzhkin A.A., Shuchev K.G., Klimov M.M. *Obrabotka materialov rezaniem* [Processing of materials by cutting]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2008. 418 p. ISBN 978-5-7890-0413-X.

26. Vul'f A.M. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.

27. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Questions of mechanics of metal cutting process]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 367 p.

28. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

29. Popov E.P., Pal'tov I.P. *Priblizhennye metody issledovaniya nelineinykh avtomaticheskikh sistem* [Approximate methods for studying nonlinear automatic systems]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 792 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). 2020 Том 22 № 1 с. 80–89
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Интерметаллидные покрытия Al_3Ti, сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки

Елена Корниенко [1, a, *], ***Анастасия Вялова*** [1, b], ***Владислав Шикалов*** [2, c], ***Владимир Косарев*** [2, d], ***Томила Видюк*** [2, e]

[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

[a] http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, kornienkoee@gmail.com, [b] https://orcid.org/0000-0003-2304-1166, nastya13-29.98@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-0491-2803, v.shikalov@gmail.com, [d] https://orcid.org/0000-0001-8989-9646, vkos@itam.nsc.ru,
[e] http://orcid.org/0000-0002-6819-8290, vidyuk@itam.nsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.044

История статьи:
Поступила: 18 ноября 2019
Рецензирование: 16 декабря 2019
Принята к печати: 20 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Холодное газодинамическое напыление
Термическая обработка
Покрытие
Интерметаллид
Алюминид титана
Ti-Al
$TiAl_3$

Финансирование
Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А19-119051590004-5)

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ССМ НГТУ и ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН)

АННОТАЦИЯ

Введение. Титановые сплавы широко используются в аэрокосмической, морской и биомедицинской промышленности благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. К сожалению, они также характеризуются низкой стойкостью к окислению и низкой износостойкостью. Эффективным решением этой проблемы является формирование износостойких и жаростойких покрытий на поверхности титановых заготовок. **Цель работы:** исследовать влияние параметров термической обработки на формирование алюминида титана из двухслойных покрытий системы Ti-Al, полученных при помощи холодного газодинамического напыления. **Материалы и методики**. В настоящей работе на пластинах из титанового сплава марки ОТ4 формировали интерметаллидные покрытия типа Al_3Ti. Для этого при помощи технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) последовательно наносили слой титанового порошка марки ПТОМ-1 (Ti – основа, N < 0,08 %, C < 0,05 %, H < 0,4 %, Fe+Ni < 0,4 %, Si < 0,1 %, Cl < 0,004 %) и слой алюминиевого порошка марки АСД-1 Al99.2 (Al > 99,7 %). Толщина каждого слоя составляла ~ 100 мкм. Образцы с покрытиями нагревали до температур 630, 640, 650 и 660 °C и выдерживали в печи 20, 120 и 300 мин (среда охлаждения – воздух). Структурные и фазовые исследования покрытий проводили с использованием световой микроскопии, растровой электронной микроскопии, рентгенофазового анализа. Приведены результаты измерений микротвердости. **Результаты.** Установлено, что интерметаллидная прослойка, сформировавшаяся на границе раздела между титановым и алюминиевым слоем, имеет химическую формулу Al_3Ti. Уровень микротвёрдости прослойки составляет ~ 600 HV. Показано, что толщина прослойки меняется в зависимости от режима термической обработки. Максимальную толщину (98,5 мкм) удалось сформировать после нагрева до 650 °C и выдержки 5 ч. Установлено, что увеличение времени выдержки оказывает большее влияние на рост толщины интерметаллида, чем увеличение температуры.

Для цитирования: Интерметаллидные покрытия Al_3Ti, сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки / Е.Е. Корниенко, А.Д. Вялова, В.С. Шикалов, В.Ф. Косарев, Т.М. Видюк // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 80–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89.

***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:** kornienkoee@gmail.com

Введение

Благодаря высокой удельной прочности, а также высокой коррозионной стойкости титановые сплавы широко используются в аэро-

космической, морской и биомедицинской промышленности [1, 2]. Однако несмотря на эти преимущества, сплавы на основе титана обладают низкой стойкостью к окислению (не более 600 °С) [2, 3] и низкой износостойкостью [4, 5], что ограничивает их применение в качестве высокотемпературных трибологических компонентов в двигателях внутреннего сгорания, например валов и лопаток газовых турбин. Эффективным решением указанной проблемы является формирование износостойких и жаростойких покрытий на поверхности титановых заготовок.

Известно, что титан активно взаимодействует со многими металлами и образует различные соединения с высоким уровнем механических свойств [6]. В настоящей работе использовали систему Ti–Al, которая позволяет получать интерметаллиды с химической формулой Al_3Ti. Отмечается, что данные интерметаллиды характеризуются низкой плотностью, высокой твердостью и жесткостью, а также стойкостью к окислению при высоких температурах [7, 8]. Благодаря этому такие покрытия можно применять для защиты деталей высокотемпературного использования [9].

В литературе достаточно широко рассмотрены особенности формирования, структура и свойства слоистых композиционных материалов системы Ti–Al, полученных из тонколистовых заготовок. В качестве основных способов получения многослойных материалов этой системы можно отметить диффузионную сварку и сварку взрывом с последующим отжигом на воздухе при температурах, близких к температуре плавления алюминия [10–12]. Формировать интерметаллидные покрытия из порошкового материала можно разными способами. Так, в работе [13] такого типа покрытия получают из порошка Al_3Ti на титановых подложках. Авторы работ [9, 14–17] наносят композиционные покрытия из смеси металлических порошков Ti и Al. Влияние параметров последующей термической обработки на особенности структуры таких покрытий отражено в работах [14, 18]. Авторы работы [19] методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки алюминиевого порошка формировали поверхностные интерметаллидные слои на заготовках из технически чистого титана. В настоящей работе описан процесс формирования интерметаллидного слоя Al_3Ti, который осуществлялся в два этапа: предварительно наносили слой титанового и алюминиевого порошка, а затем проводили нагрев композиции для формирования интерметаллидного слоя. Для того чтобы взаимодействие титана и алюминия во время термической обработки протекало максимально эффективно, необходим плотный контакт поверхностей частиц, а также отсутствие оксидных пленок. Умеренная температура и высокая скорость напыления частиц при холодном газодинамическом напылении (ХГН) в полной мере удовлетворяют этим требованиям [20]. Стоит отметить, что несмотря на значительный интерес к покрытиям системы Ti–Al, особенности формирования интермеллидов из слоистых порошковых покрытий с последующей термической обработкой изучены недостаточно. В настоящей работе исследовано влияние параметров термической обработки (температура нагрева и время выдержки) на формирование алюминида титана из двухслойных покрытий системы Ti–Al, полученных при помощи холодного газодинамического напыления.

Методика экспериментального исследования

В качестве материалов для формирования слоистых покрытий использовали коммерческие порошки титана марки ПТОМ-1 (Ti – основа, N < 0,08 %, C < 0,05 %, H < 0,4 %, Fe + Ni < 0,4 %, Si < 0,1 %, Cl < 0,004 %) и алюминия марки АСД-1 Al99.2 (Al > 99,7 %). Средние размеры частиц порошков титана и алюминия составляли 17 и 30 мкм соответственно. На поверхность пластины из титанового сплава марки ОТ4 (Ti – основа, Al – 2 %, Mn – 1,4 %) размерами 50×50 мм и толщиной 5 мм наносили последовательно слои титанового и алюминиевого покрытия.

Напыление было выполнено в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН на ХГН-стенде, оснащенном шестиосевым роботом KUKA KR 16-2 (KUKA, Германия) для управления соплом. Ускорение частиц порошка осуществлялось в сопле Лаваля диаметром критического сечения 2,8 мм и диаметром выходного сечения 6,5 мм. В качестве рабочего газа использовали сжатый воздух с давлением торможения 2,7 МПа. При

напылении титанового порошка температура торможения была равна 770 К, скорость и шаг сканирования – 800 мм/с и 3 мм соответственно. При напылении алюминиевого порошка температура торможения составляла 570 К, скорость и шаг сканирования – 200 мм/с и 3 мм соответственно. В обоих случаях расстояние от среза сопла до преграды было равно 30 мм.

Затем из пластин с покрытиями вырезали образцы размером 10×10 мм, которые нагревали в лабораторных электрических печах камерного типа (СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И3) до температур 630, 640, 650 и 660 °С. Время выдержки составило 20, 120 и 300 мин, охлаждение проводили на воздухе.

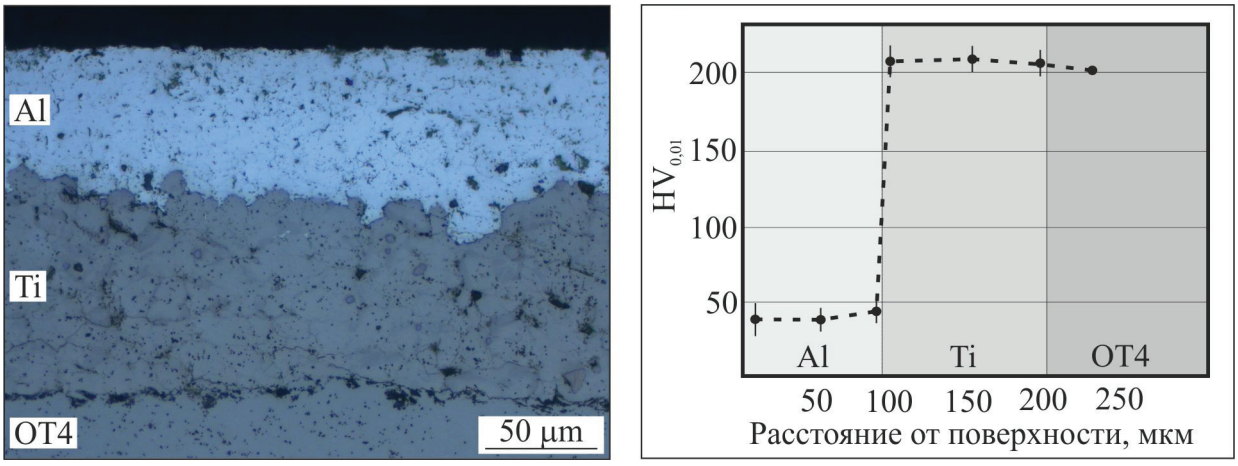
Образцами для структурных исследований, а также измерений микротвердости являлись поперечные микрошлифы, подготовленные по стандартной методике: механическое шлифование – с использованием суспензий, содержащих частицы Al_2O_3 различной зернистости (9, 6, 3 и 1 мкм), и финишное полирование на сукне – с использованием коллоидного раствора оксида кремния зернистостью 0,04 мкм. Микроструктуру образцов исследовали с применением оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, а также растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Фазовый состав изучали на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA в CuKα излучении. Дифрактограммы регистрировали в режиме времени t = 3 с и шагом $\Delta 2\theta$ = = 0,05º. Для выявления фазового состава с каждого образца со стороны покрытия снимали слой толщиной 100 мкм (толщина алюминиевой прослойки). Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 10 г.

Результаты и их обсуждение

Общий вид образца с двухслойным покрытием Ti-Al представлен на рис. 1, *а*. Толщина каждого слоя составляла около 100 мкм. Границы раздела между основным металлом и титановым слоем, а также между прослойками Ti и Al плотные.

Измерения микротвердости проводили в направлении от края покрытия к основному металлу. Было зафиксировано резкое изменение микротвердости только при переходе из алюминиевого слоя в титановый (рис. 1, *б*). Средняя величина микротвердости алюминиевого слоя составляет 38,5 HV, титанового – 213 HV.

Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что непосредственно после холодного газодинамического напыления формируется качественное двухслойное покрытие, алюминидов титана в котором не обнаружено. Это обусловлено кратковременностью процессов теплового воздействия контактируемых поверхностей. Ранее было отмечено, что прак-



а *б*

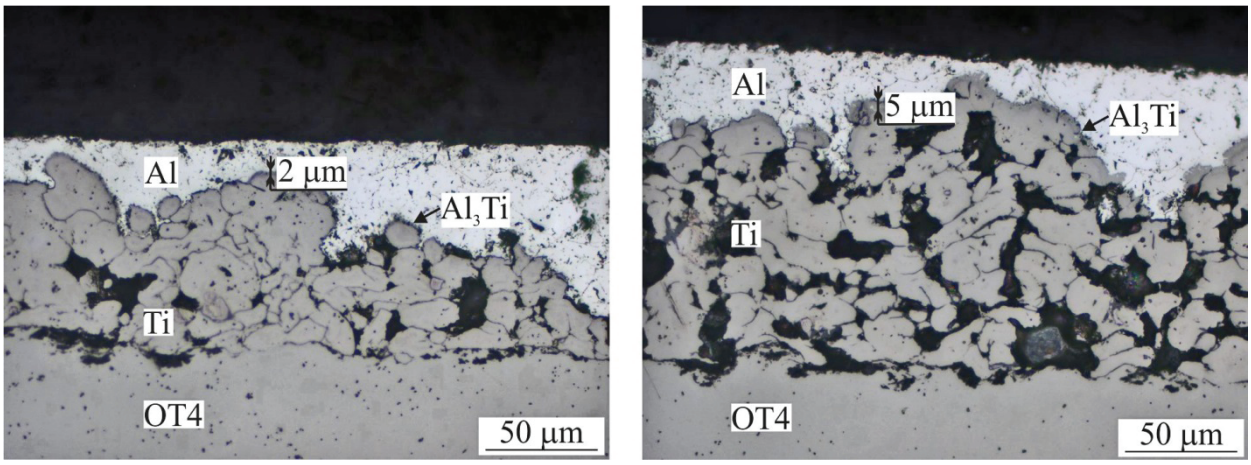
Рис. 1. Изображение двухслойного покрытия Ti-Al после холодного газодинамического напыления (*а*) и значения микротвердости (*б*)

Fig. 1. The image of Ti-Al duplex coating after gas dynamic cold spray (*a*) and coating microhardness (*б*)

тическое значение имеют слоистые покрытия типа «металл – интерметаллид», толщина интерметаллидной прослойки в которых соизмерима либо превышает толщину металлического слоя. Известно, что образование алюминидов титана связано с протеканием диффузионных процессов, для активизации которых была проведена дополнительная термическая обработка покрытий.

С целью формирования интерметаллидной прослойки исходные покрытия выдерживали 30 и 120 мин при 630 °С. Выбор этой температуры обусловлен тем, что алюминий еще не плавится, но при этом скорость прохождения диффузионных процессов является близкой к максимальной в условиях твердофазной диффузии.

При нагреве на поверхности прилегающих друг к другу слоев алюминия и титана начинается диффузия, приводящая к образованию новой фазы. Посредством световой микроскопии выявлено, что уже после 30 мин выдержки толщина интерметаллидной прослойки на границе раздела достигает ~ 2 мкм (рис. 2, *а*). С увеличением времени выдержки до 2 ч средняя толщина прослойки возрастает и достигает ~ 5 мкм (рис. 2, *б*).



а *б*

Рис. 2. Двухслойное покрытие после нагрева до 630 °С и выдержки 30 мин (*а*) и 2 ч (*б*)

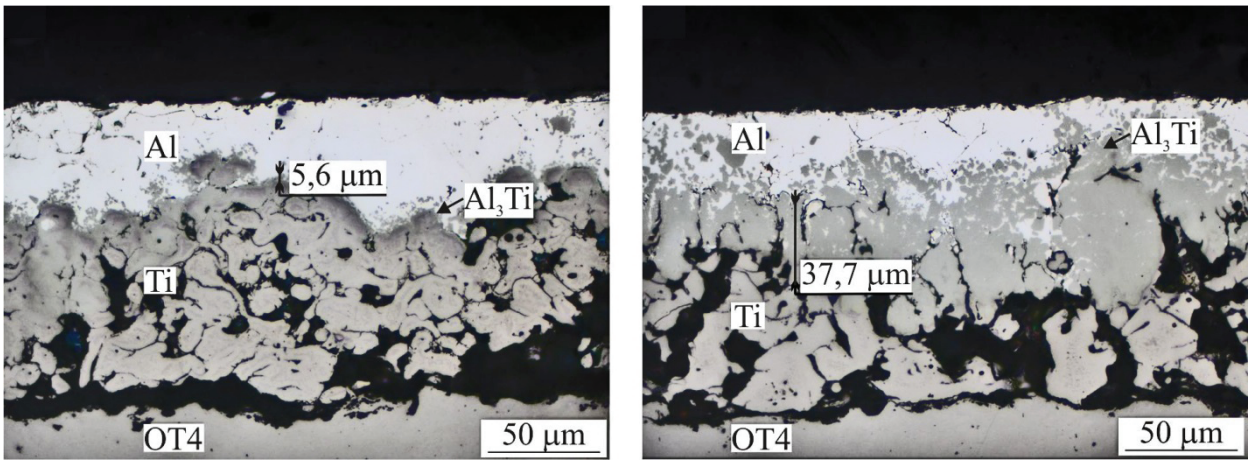
Fig. 2. Duplex coating after heating up to 630 °C and holding 30 min (*а*) and 2 h (*б*)

Повышение температуры до 660 °С (температура плавления алюминия) также способствует росту толщины слоя интерметаллида. На рис. 3, *а* показано, что выдержка в течение 30 мин при этой температуре позволяет сформировать слой толщиной до 5,6 мкм. Стоит отметить, что ширина сформированного слоя незначительно отличается от ширины слоя, сформированного при температуре 630 °С и выдержке 2 ч (рис. 2, *б*). Увеличение времени выдержки до 2 ч при 660 °С позволяет увеличить толщину прослойки в шесть раз (до 37 мкм (рис. 3, *б*)). Частицы титанового слоя, не вступившие в реакцию с алюминием, при нагреве окисляются по границам, и при подготовке микрошлифов выкрашиваются.

На рис. 4 представлено распределение химических элементов по линии, пересекающей сформировавшуюся прослойку и области прилегающих к ней алюминиевого и титанового слоев. Видно, что содержание алюминия и титана в прослойке одинаково по всей ее длине. Можно предположить, что прослойка представляет собой интерметаллид алюминия и титана. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (см. таблицу) атомное содержание алюминия, равное 71,89 %, свидетельствует об образовании интерметаллида Al_3Ti.

Согласно данным рентгенофазового анализа фаза Al_3Ti наблюдается в покрытиях уже после нагрева до 630 °С и выдержке 30 мин (рис. 5, *б*). С увеличением времени выдержки и температуры нагрева объемная доля интерметаллидной фазы увеличивается. Титана после нагрева до 660 °С и выдержки 2 ч в покрытии не наблюдается (рис. 5, *д*).

При проведении дюрометрических испытаний в направлении от верха покрытия к основному металлу установлено, что сформировавшаяся прослойка характеризуется максимальными



а *б*

Рис. 3. Толщина интерметаллидной прослойки после нагрева до 660 °С и выдержки 30 мин (*а*) и 120 мин (*б*)

Fig. 3. Thickness of intermetallic layer after heating up to 660 °C and holding 30 min (*a*) and 120 min (*б*)

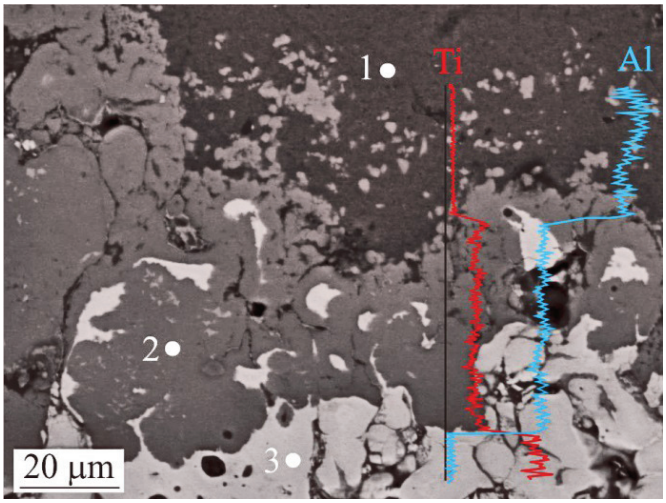


Рис. 4. Распределение химических элементов по линии. Режим термической обработки: температура нагрева – 660 °С, время выдержки – 2 ч

Fig. 4. The chemical elements distribution in the line. The heat treatment regime is heating 660 °C and holding 2 h

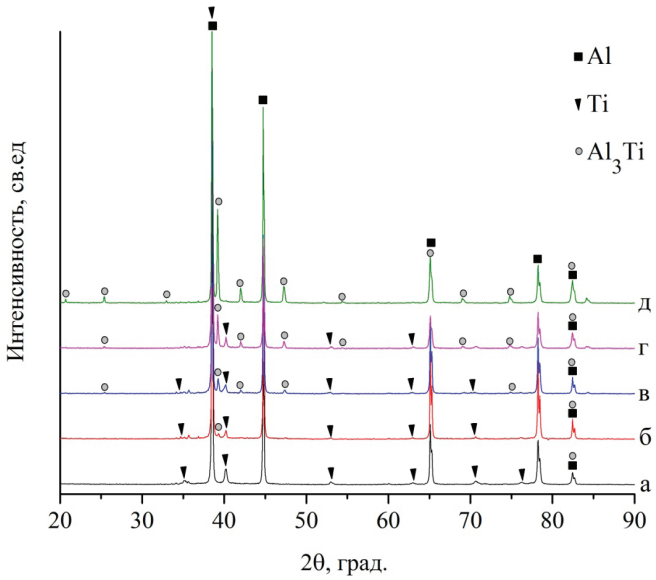


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ:

а – покрытие без термической обработки; *б* – 630 °С, 30 мин; *в* – 630 °С, 2 ч; *г* – 660 °С, 30 мин; *д* – 660 °С, 2 ч

Fig. 5. X-ray diffraction analyses:

а – initial coating; *б* – 630 °C, 30 min; *в* – 630 °C, 2 h; *г* – 660 °C, 30 min; *д* – 660 °C, 2 h

Данные микрорентгеноспектрального анализа

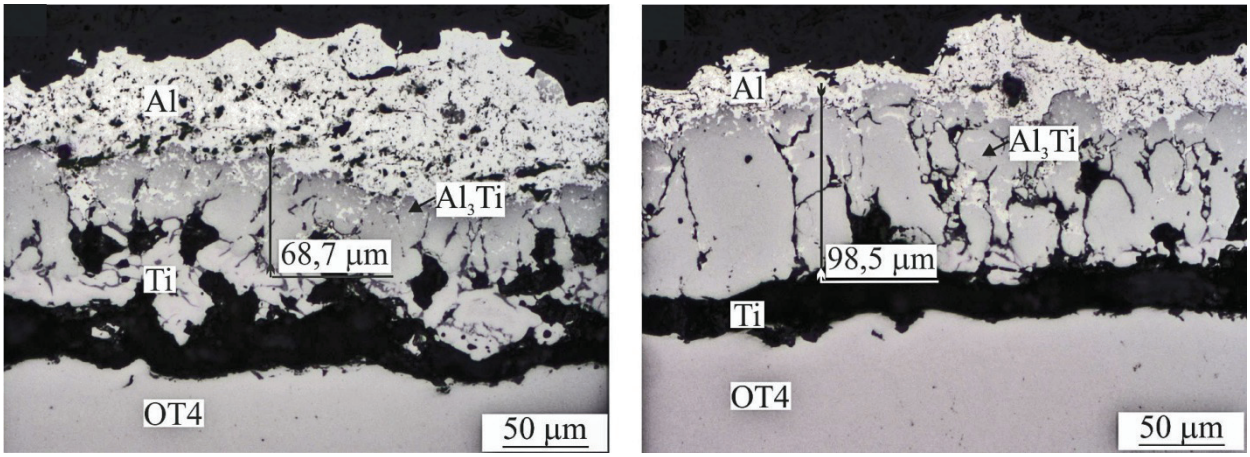
The data of micro-X-ray spectral analysis

Спектр/ Spectrum	Химический элемент, ат. %/ Chemical element, at. %	
	Al	Ti
1	100	–
2	71,89	28,11
3	–	100

значениями микротвердости (≈ 600 HV). Это намного выше, чем микротвердость алюминия и титана, и соответствует микротвердости интерметаллида Al_3Ti.

При выполнении работы образцы также нагревали до промежуточных температур 640 и 650 °С и выдерживали в течение двух и пяти часов. Выдержка в течение двух часов при этих

температурах способствует незначительному росту толщины интерметаллидной прослойки (по сравнению с температурой 630 °С) до ~ 6,3 и ~ 12,5 мкм соответственно. Увеличение времени выдержки до пяти часов при этих же температурах привело к значительному росту толщины прослоек: до ~ 68,7 (рис. 6, *а*) и ~ 98,5 мкм (рис. 6, *б*) соответственно.



а *б*

Рис. 6. Двухслойное покрытие после нагрева до 640 °С (*а*) и 650 °С (*б*) и выдержки 5 ч

Fig. 6. Duplex coating after heating up to 640 °C (*а*) and 650 °C (*б*) and holding 5 h

На рис. 7 представлена зависимость толщины интерметаллидной прослойки от режимов термической обработки. Видно, что отжиг в течение пяти часов образцов со слоистыми покрытиями Ti-Al, полученными холодным газодинамическим напылением, привел к формированию максимальной толщины интерметаллида. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод: увеличение времени выдержки оказывает большее влияние на рост толщины интерметаллида, чем температура.

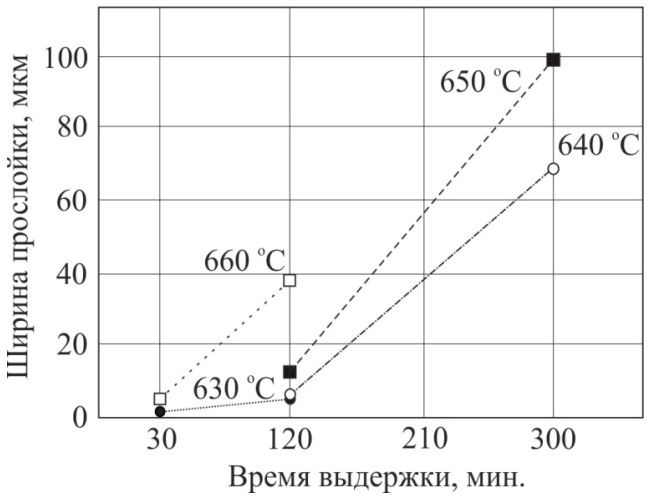


Рис. 7. Зависимость толщины интерметаллидной прослойки от режимов термической обработки

Fig. 7. Dependence of intermetallic layer thickness on heat treatment regimes

Выводы

1. Холодное газодинамическое напыление является эффективным технологическим процессом для формирования высококачественных слоистых покрытий типа «титан – алюминий». Границы раздела между основным металлом и титановым слоем, а также между прослойками Ti и Al плотные, без наличия оксидных пленок.

2. Методами микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализа установлено, что интерметаллидной прослойке, формирующейся на границе раздела между титановым и алюминиевым слоем, соответствует химическая формула Al_3Ti. Уровень микротвердости прослойки составляет ~ 600 HV.

3. Методом световой и растровой микроскопии показано, что толщина прослойки меняется в зависимости от режима термической обработки. Максимальную толщину прослойки (98,5 мкм) удалось сформировать после нагрева до 650 °С и выдержки в течение пяти часов.

4. Установлено, что увеличение времени выдержки оказывает большее влияние на рост толщины интерметаллида, чем увеличение температуры.

Список литературы

1. *Valkov S., Bezdushnyi R., Petrov P.* Synthesis, structure and mechanical properties of Ti-Al-Nb coatings formed by electron beam additive technique // Vacuum.

2018. – Vol. 156. – P. 140–145. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.07.021.

2. *Chen C., Feng X., Shen Y.* Oxidation behavior of a high Si content Al–Si composite coating fabricated on Ti-6Al-4V substrate by mechanical alloying method // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 701. – P. 27–36. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.078.

3. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of Ti-Al-Nb coatings on a Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser surface alloying / J. Dai, S. Li, H. Zhang, H. Yu, C. Chen, Y. Li // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 344. – P. 479–488. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.060.

4. *Tavoosi M., Arjmand S.* In situ formation of Al/Al_3Ti composite coating on pure Ti surface by TIG surfacing process // Surfaces and Interfaces. – 2017. – Vol. 8. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.surfin.2017.04.002.

5. *Sitek R., Bolek T., Mizera J.* Microstructure and properties of Ti-Al intermetallic/Al2O3 layers produced on Ti6Al2Mo2Cr titanium alloy by PACVD method // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 437. – P. 19–27. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.169.

6. *Mitra R.* Structural intermetallics and intermetallic matrix composites. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 301 p. – ISBN 978-1-4665-1188-0.

7. Intermetallics research progress / Y.N. Berdovsky, ed. – New York: Nova Science Publishers, 2008. – 290 p. – ISBN 978-1600219825.

8. *Salehi M., Tahvilian A., Karimzadeh F.* Surface characteristics and tribological properties of Ti-Al intermetallic compound coatings on ferrous substrates // Surface Engineering. – 2002. – Vol. 18. – P. 368–372. – DOI: 10.1179/026708402225006231.

9. Formation of detonation coatings based on titanium aluminide alloys and aluminium titanate ceramic sprayed from mechanically alloyed powders Ti-Al / V.E. Oliker, V.L. Sirovatka, I.I. Timofeeva, T.Ya. Gridasova, Ye.F. Hrechyshkin // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 200, iss. 11. – P. 3573–3581. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.139.

10. The formation of $TiAl_3$ during heat treatment in explosively welded Ti-Al multilayers / F. Foadian, M. Soltanieh, M. Adely, M. Etminanbakhsh // Iranian Journal of Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 11, iss. 4. – P. 12–19.

11. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites / V. Mali, D. Lazurenko, I. Bataev, A. Bataev, A. Smirnov, P. Yartsev, V. Bazarkina // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 311. – P. 236–239. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.236.

12. *Chen Q., Li W., Yang R.* Investigation of growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coating on Al-Ti double-layer composite plate // Materials (Basel). – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 272. – DOI: 10.3390/ma12020272.

13. Detonation spraying of Ti-Al intermetallics: phase and microstructure development of the coatings / D. Dudina, I. Batraev, V. Ulianitsky, N. Bulina, M. Korchagin, O. Lomovsky // Materials and Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 30, iss. 6. – P. 724–729. – DOI: 10.1080/10426914.2014.984221.

14. Fabrication of TiAl intermetallic phases by heat treatment of warm sprayed metal precursors / J. Sienkiewicz, S. Kuroda, R.M. Molak, H. Murakami, H. Araki, S. Takamori, K.J. Kurzydłowski // Intermetallics. – 2014. – Vol. 49. – P. 57–64. – DOI: 10.1016/j.intermet.2013.12.011.

15. Cold-spray coatings: recent trends and future perspectives / P. Cavaliere, ed. – Cham: Springer, 2018. – 569 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-67183-3_14.

16. *Adachi S., Nakata K.* Study of bonding strength of plasma sprayed Ti-Al coating on mild steel substrate // Plasma Processes and Polymers. – 2007. – Vol. 4, iss. S1. – P. S512–S515. – DOI: 10.1002/ppap.200731217.

17. *Adachi S., Nakata K.* Improvement of adhesive strength of Ti–Al plasma sprayed coating // Surface and Coating Technology. – 2007. – Vol. 201, iss. 9–11. – P. 5617–5620. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.014.

18. Oxidation resistance and modification reaction mechanism of Al coating sprayed on pure Ti substrate / Q. Jia, D. Li, S. Guan, Z. Zhang, N. Zhang, W. Zhao // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 1403521. – DOI: 10.1155/2018/1403521.

19. Поверхностное легирование титана алюминием с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей / И.А. Батаев, Д.В. Лазуренко, М.Г. Голковский, И.С. Лаптев, И.К. Чакин, И.С. Иванчик // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 1. – С. 51–60. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60.

20. Холодное газодинамическое напыление: теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. – М.: Физматлит, 2010. – 539 с. – ISBN 978-5-9221-1210-9.

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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 80–89
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Al_3Ti Intermetallic Coatings obtained with Help Gas Dynamic Cold Spray and Heat Treatment

Elena Kornienko [1, a,*], ***Anastasiya Vyalova*** [1, b], ***Vladislav Shikalov*** [2, c], ***Vladimir Kosarev*** [2, d], ***Tamila Vidyuk*** [2, e]

[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

[a] http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, kornienkoee@gmail.com, [b] https://orcid.org/0000-0003-2304-1166, nastya13-29.98@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-0491-2803, v.shikalov@gmail.com, [d] https://orcid.org/0000-0001-8989-9646, vkos@itam.nsc.ru,
[e] http://orcid.org/0000-0002-6819-8290, vidyuk@itam.nsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 18 November 2019
Revised: 16 December 2019
Accepted: 20 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Gas dynamic cold spray
Heat treatment
Coating
Intermetallic
Titanium aluminide
Ti-Al
$TiAl_3$

Funding
The research was partly carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences in 2013-2020 (project No. AAAA-A19-119051590004-5)

Acknowledgements
The research was conducted at NSTU Materials Research Center and with using the equipment of the Joint Access Center "Mechanics" of ITAM SB RAS.

ABSTRACT

Introduction. Titanium alloys are widely used in aerospace, marine and biomedical industries due to its high strength-to-weight ratio and corrosion resistance. Unfortunately, these alloys are also characterized by low oxidation resistance and low wear resistance. An effective solution of this problem is the formation of wear-resistant and heat-resistant coatings on the surface of titanium workpieces. **The work purpose** is to investigate the influence of heat treatment parameters on the formation of titanium aluminide from Ti-Al duplex coatings obtained by gas dynamic cold spray. **Materials and methods.** Al_3Ti intermetallic coatings were formed on plates made of titanium alloy (Ti – base, Al < 2.5 %, Mn < 1.5 %). A layer of titanium powder (Ti – base, N < 0.08 %, C <0.05 %, H < 0.4 %, Fe + Ni < 0.4 %, Si < 0.1 %, Cl < 0.004 %) and a layer of aluminum powder (Al > 99.7 %) were applied on the substrate using the technology of gas dynamic cold spray. The thickness of each layer was ~ 100 μm. Then the samples with coatings were heated in different regimes (heat temperature was 630, 640, 650, and 660 °C; time holding was 20, 120, and 300 min; cooling medium was air). Structural and phase studies of coatings were carried out with using light microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray phase analysis. The results of microhardness measurements are presented. **Results.** It is established that the intermetallic layer formed at the interface between the titanium and aluminum layers is Al_3Ti. The microhardness level of the intermetallic layer is ~ 600 HV. It is showed that the Al_3Ti layer thickness varies depending on the heat treatment regimes. The maximum thickness (98.5 μm) of intermetallic layer is observed after heating up to 650 °C and holding during 5 hours. It is established that an increase in the holding time has a greater effect on the increase in the thickness of the Al_3Ti than an increase in temperature.

For citation: Kornienko E.E., Vyalova A.D., Shikalov V.S., Kosarev V.F., Vidyuk T.M. Al_3Ti Intermetallic Coatings obtained with Help Gas Dynamic Cold Spray and Heat Treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 80–89. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89. (In Russian).

*** 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:** kornienkoee@gmail.com

References

1. Valkov S., Bezdushnyi R., Petrov P. Synthesis, structure and mechanical properties of Ti-Al-Nb coatings formed by electron beam additive technique. *Vacuum*, 2018, vol. 156, pp. 140–145. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.07.021.

2. Chen C., Feng X., Shen Y. Oxidation behavior of a high Si content Al–Si composite coating fabricated on Ti-6Al-4V substrate by mechanical alloying method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 701, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.078.

3. Dai J., Li S., Zhang H., Yu H., Chen C., Li Y. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of Ti-Al-Nb coatings on a Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser surface alloying. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 344, pp. 479–488. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.060.

4. Tavoosi M., Arjmand S. In situ formation of Al/Al_3Ti composite coating on pure Ti surface by TIG surfacing process. *Surfaces and Interfaces*, 2017, vol. 8, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.surfin.2017.04.002.

5. Sitek R., Bolek T., Mizera J. Microstructure and properties of Ti-Al intermetallic/Al_2O_3 layers produced on Ti6Al2Mo2Cr titanium alloy by PACVD method. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 437, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.169.

6. Mitra R. *Structural intermetallics and intermetallic matrix composites*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 301 p. ISBN 978-1-4665-1188-0.

7. Berdovsky Y.N., ed. *Intermetallics research progress*. New York, Nova Science Publishers, 2008. 290 p. ISBN 978-1600219825.

8. Salehi M., Tahvilian A., Karimzadeh F. Surface characteristics and tribological properties of Ti-Al intermetallic compound coatings on ferrous substrates. *Surface Engineering*, 2002, vol. 18, pp. 368–372. DOI: 10.1179/026708402225006231.

9. Oliker V.E., Sirovatka V.L., Timofeeva I.I., Gridasova T.Ya, Hrechyshkin Ye.F. Formation of detonation coatings based on titanium aluminide alloys and aluminium titanate ceramic sprayed from mechanically alloyed powders Ti-Al. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, iss. 11, pp. 3573–3581. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.139.

10. Foadian F., Soltanieh M., Adely M., Etminanbakhsh M. The formation of $TiAl_3$ during heat treatment in explosively welded Ti-Al multilayers. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 11, iss. 4, pp. 12–19.

11. Mali V., Lazurenko D., Bataev I., Bataev A., Smirnov A., Yartsev P., Bazarkina V. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 311, pp. 236–239. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.236.

12. Chen Q., Li W., Yang R. Investigation of growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coating on Al-Ti double-layer composite plate. *Materials (Basel)*, 2019, vol. 12, iss. 2, p. 272. DOI: 10.3390/ma12020272.

13. Dudina D., Batraev I., Ulianitsky V., Bulina N., Korchagin M., Lomovsky O. Detonation spraying of Ti-Al intermetallics: phase and microstructure development of the coatings. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, vol. 30, iss. 6, pp. 724–729. DOI: 10.1080/10426914.2014.984221.

14. Sienkiewicz J., Kuroda S., Molak R.M., Murakami H., Araki H., Takamori S., Kurzydłowski K.J. Fabrication of TiAl intermetallic phases by heat treatment of warm sprayed metal precursors. *Intermetallics*, 2014, vol. 49, pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.12.011.

15. Cavaliere P., ed. *Cold-spray coatings: recent trends and future perspectives*. Cham, Springer, 2018. 569 p. DOI: 10.1007/978-3-319-67183-3_14.

16. Adachi S., Nakata K. Study of bonding strength of plasma sprayed Ti-Al coating on mild steel substrate. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, vol. 4, iss. S1, pp. S512–S515. DOI: 10.1002/ppap.200731217.

17. Adachi S., Nakata K. Improvement of adhesive strength of Ti–Al plasma sprayed coating. *Surface and Coating Technology*, 2007, vol. 201, iss. 9–11, pp. 5617–5620. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.014.

18. Jia Q., Li D., Guan S., Zhang Z., Zhang N., Zhao W. Oxidation resistance and modification reaction mechanism of Al coating sprayed on pure Ti substrate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018, art. 1403521. DOI: 10.1155/2018/1403521.

19. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Golkovski M.G., Laptev I.S., Chakin I.K., Ivanchik I.S. Surface alloying of titanium with aluminium by non-vacuum electron beam cladding of power mixtures. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 1, pp. 51–60. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60. (In Russian).

20. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie: teoriya i praktika* [Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 539 p. ISBN 978-5-9221-1210-9.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 90–101
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние структуры материала на морфологию деформированной поверхности

Екатерина Алфёрова [1, a,*], ***Андрей Филиппов*** [2, b]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия
[2] Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0001-9579-6870, katerina525@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-0487-8382, andrey.v.filippov@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 538.9

История статьи:
Поступила: 24 октября 2019
Рецензирование: 27 декабря 2019
Принята к печати: 20 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Морфология поверхности
Деформация
Трехмерные параметры шероховатости
Монокристаллы
Поликристаллы
Ультрамелкозернистые металлы
Микроструктура

Финансирование
Результаты получены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (проект № III.23.2.4). Работа выполнена при поддержке Томского политехнического университета в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

Благодарности
Авторы благодарят проф. д.ф.-м.н. Д.В. Лычагина за образцы монокристаллов.

АННОТАЦИЯ

Введение. Морфологические изменения свободной поверхности материалов в процессе нагружения интересны с фундаментальной и практической точки зрения. В первом случае благодаря деформационному рельефу ученые судят о процессах, протекающих внутри материала, идентифицируют механизмы деформации, анализируют изменение напряженно-деформированного состояния и т.д. Во втором случае деформационный рельеф представляет собой нежелательное явление, так как он ухудшает сопротивление усталости, адгезию, приводит к растрескиванию и снижает другие физико-механические свойства деталей машин. Кроме того, на основе деформационного рельефа пытаются оценивать остаточный ресурс работы деталей машин. Сегодня промышленность использует материалы в различном структурном состоянии. Микроструктура металла (наличие или отсутствие зерен и границ зерен, размер зерна, текстура, кристаллографическая ориентация и т.д.) оказывает существенное влияние на характер протекания пластической деформации и морфологию деформированной поверхности. **Цель работы**: изучить влияние структуры материала на эволюцию морфологии поверхности в процессе деформации. **В работе исследованы** никелевые образца в монокристаллическом, поликристаллическом и ультрамелкозернистом состоянии. **Методами исследования** являются механические испытания на сжатие, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Количественная оценка проводилась с использованием стандартизированных трехмерных параметров шероховатости. **Результаты и обсуждение**. В работе показано, влияние внутренней структуры материала на эволюцию морфологии деформационной поверхности. Изменения в деформационном рельефе обсуждены с точки зрения преобладающих деформационных механизмов для каждого структурного состояния материала. Показано, что с использованием трехмерных параметров шероховатости можно оценить наличие потенциальных концентраторов напряжений на поверхности. Было определено, что наличие глубоких острых впадин наиболее присуще материалу в поликристаллическом состоянии. Результаты работы могут быть полезны для аргументированного выбора микроструктуры материала при изготовлении деталей машин и для математического моделирования поведения металлов под нагрузкой.

Для цитирования: *Алфёрова Е.А., Филиппов А.В.* Влияние структуры материала на морфологию деформированной поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 90–101. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101.

Введение

Конструкционные материалы являются фундаментом промышленности, поэтому важным вопросом является характер их поведения в процессе нагружения. Морфологические характери-

***Адрес для переписки**
Алфёрова Екатерина Александровна, к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30,
634050, г. Томск, Россия
Тел. +7-909-547-12-01, **e-mail**: Katerina525@mail.ru

стики поверхности под нагрузкой могут меняться, что часто имеет негативные последствия для деталей машин, так как шероховатость поверхности влияет на отражательные, адгезионные и другие эксплуатационные свойства, а также может способствовать зарождению трещин. Существуют работы, которые показывают, что благодаря оценке морфологии поверхности можно судить о внутреннем состоянии материала [1–10] и прогнозировать ресурс работы деталей машин [11].

Кроме того, сегодня в промышленности используются материалы в различном структурном состоянии. Микроструктурные параметры такие, как размер зерна, кристаллографическая ориентация, текстура, сложное напряженно-деформированное состояние, вызванное внутренней структурой, влияют на морфологию и шероховатость поверхности в процессе нагружения [2, 12–13]. Особенно перспективными на сегодняшний день выглядят материалы с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ). Деформационное поведение УМЗ сплавов обычно характеризуется повышением их прочностных свойств и снижением пластичности. Ряд работ сообщают о положительном влиянии интенсивной пластической деформации на свойства материалов [14–17], но вместе с тем есть сведения и о ее отрицательном влиянии [18, 19].

Таким образом, интересно было бы проследить влияние исходной внутренней структуры металла на эволюцию морфологии поверхности в процессе нагружения и провести количественную и качественную оценку деформационного рельефа.

Целью работы является исследование и количественная оценка влияния структуры материала на морфологию деформированной поверхности, в том числе рассмотрение возможности применения трехмерных параметров шероховатости для выявления различий в деформационных механизмах материалов с разной структурой (моно-, поликристаллы и материалы в УМЗ состоянии), а также потенциальных концентраторов напряжений на поверхности.

Методика экспериментального исследования

Для того чтобы проследить влияние внутренней структуры на морфологию деформированной поверхности, в качестве объекта исследования был выбран никель в различном структурном состоянии: монокристаллы никеля (чистота 99,99 %) с ориентацией осей сжатия в углах стереографического треугольника; поликристаллический никель марки НП1 (отжиг при 800 °С в течение одного часа) с размером зерна 170 ± 23 мкм. Образцы в УМЗ-состоянии получены равноканальным угловым прессованием (РКУП) с поворотом заготовки на угол в 90° относительно продольной оси перед каждым последующим циклом прессования (схема Вс, восемь проходов).

Деформацию сжатием проводили на испытательной машине Instron ElektroPuls E10000 при скорости $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ $с^{-1}$. Картину деформационного рельефа снимали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Размер сканированного участка в каждом отдельном случае составлял 0,066 $мм^2$ (0,256×0,256 мм). Разрешение по глубине – 0,06 мкм. Исследования проведены в интервале деформации 1,5…32 %.

Для описания морфологии деформированной поверхности использовали трехмерные параметры шероховатости (расчет по всей сканируемой поверхности), нормированные согласно стандарту [20]. В настоящей статье были использовали количественные параметры:

Sq – среднее квадратичное значение высоты поверхности ограниченного масштаба (root mean square height of the scale-limited surface).

Ssk – асимметрия поверхности ограниченного масштаба (skewness of the scalelimited surface).

Дополнительно для количественной оценки развития деформационного рельефа был использован безразмерный параметр *Fr* (интенсивность деформационного рельефа/фактор шероховатости), который представляет собой отношение площади реальной поверхности к площади проекции:

$$Fr = (Sd/Sp) - 1,$$

где *Sd* – площадь поверхности после деформации (истинная площадь поверхности); *Sp* – площадь горизонтальной проекции поверхности (геометрическая площадь поверхности) [21, 22].

Физический смысл параметра *Fr* заключается в том, что он оценивает степень развитости деформационного рельефа на поверхности. Параметр *Fr* не стандартизирован.

Результаты и их обсуждение

Деформационный рельеф, формирующийся при нагружении образцов никеля в разном структурном состоянии, показан на рис. 1.

Для монокристаллов характерно образование следов сдвига по октаэдрическим плоскостям и дальнейшая их организация в пачки плоскостей скольжения для ориентации [001] (рис. 1, *а*, *б*), в мезополосы – для [110] и в макрополосы и складки – для [111]. Для монокристаллов никеля авторы подробно описали зависимость деформационного рельефа от кристаллографической ориентации в работе [23].

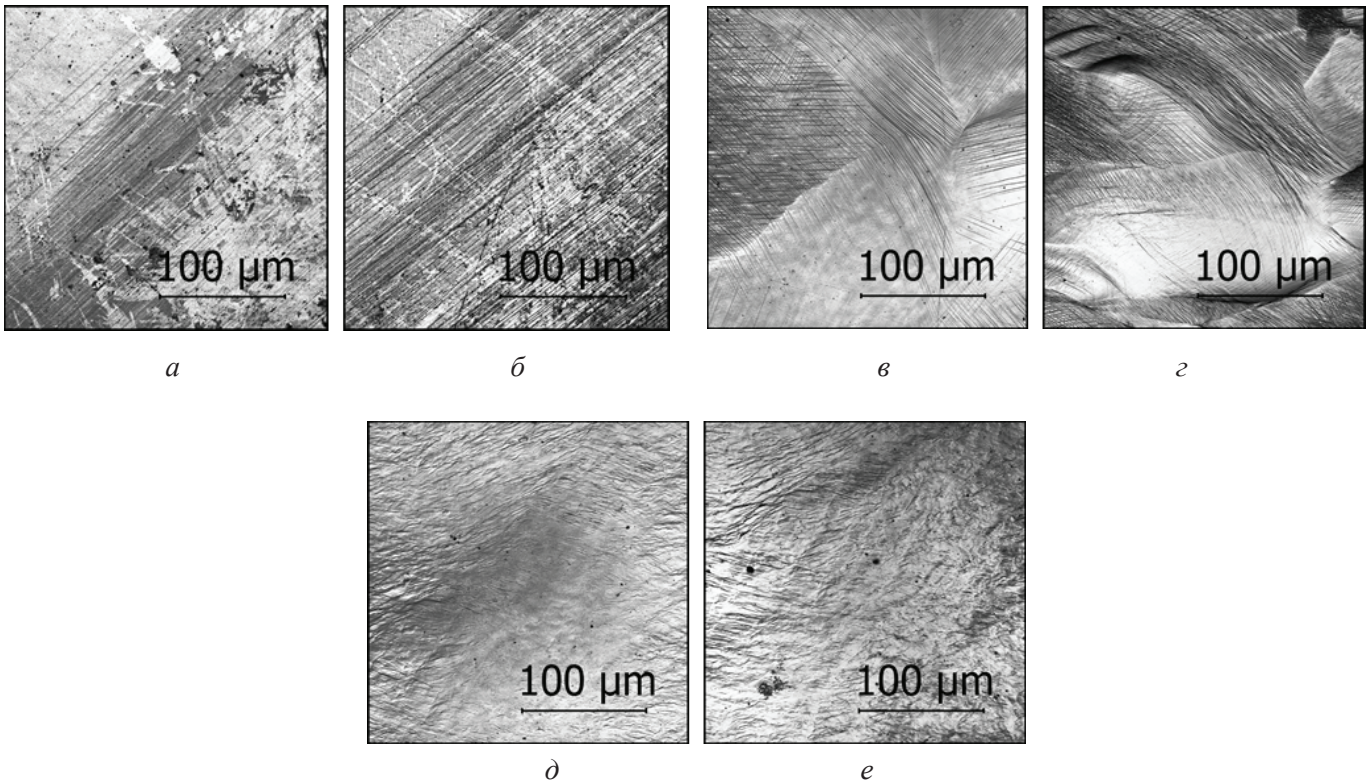
Для поликристаллического агрегата (рис. 1, *в*, *г*) наблюдается первоначальное образование следов скольжения внутри зерен по наиболее нагруженным октаэдрическим плоскостям, далее начинают формироваться следы сдвига в менее нагруженных системах скольжения, появляются более сложные элементы рельефа складки, изогнутые полосы, отмечается сдвиг зерен по границам (рис. 2, стрелкой указан перепад высот между соседними зернами). Мы не наблюдали пересечения следами сдвига границ зерен при используемом увеличении.

Для образцов в УМЗ-состоянии характерно наличие коротких изогнутых следов, расположенных в различных направлениях с самого начала нагружения, при увеличении степени деформации они огрубляются.

Далее проведем количественный анализ деформационного рельефа.

Фактор шероховатости *Fr* позволяет оценить степень развитости деформационного рельефа на поверхности с увеличением степени деформации (рис. 3).

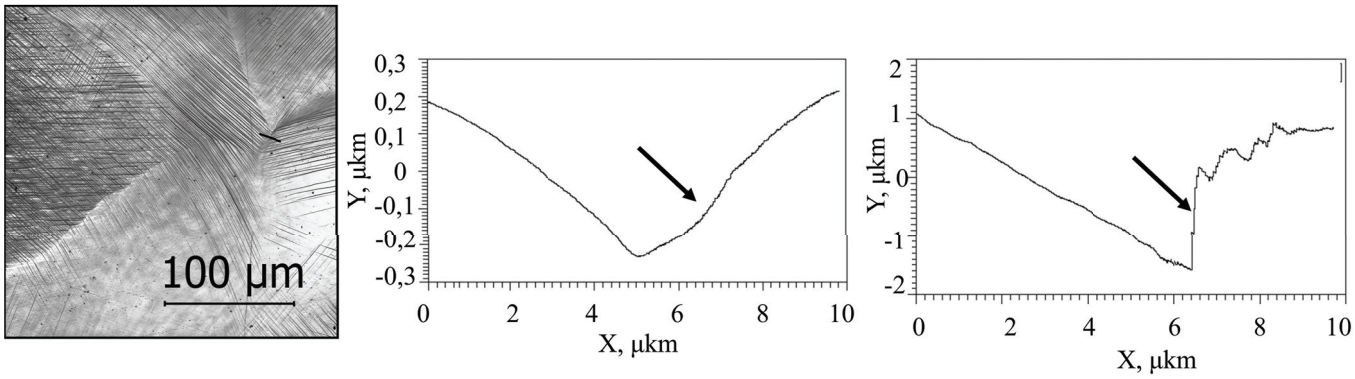
Для поликристалла значение *Fr* растет наиболее интенсивно в сравнении с монокристаллами и материалом в УМЗ-состоянии. Зависимость может быть описана экспоненциальным законом, когда $y = 0{,}002e^{0{,}16x}$, $R^2 = 0{,}97$. Далее следуют материалы в УМЗ-состоянии при $y = 0{,}001e^{0{,}17x}$, $R^2 = 0{,}88$. Для монокристаллов мы можем отметить рост фактора шероховатости, но его характер не столь интенсивный.



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 1. Деформационный рельеф после $e = 7$ % (*а*, *в*, *д*), $e = 27$ % (*б*, *г*, *е*); [001] – монокристалл (*а*, *б*); поликристалл (*в*, *г*); УМЗ-состояние (*д*, *е*)

Fig. 1. The deformation relief after $e = 7$ % (*а*, *в*, *д*), $e = 27$ % (*б*, *г*, *е*); [001] single crystal (*а*, *б*); polycrystal (*в, г*); ECAP state (*д*, *е*)



а *б* *в*

Рис. 2. Деформационный рельеф после e = 26 % (*а*), профиль поверхности вдоль секущей e = 8 % (*б*), e = 26 % (*в*)

Fig. 2. The deformation relief after e = 26% (*а*), the surface profile along the secant line e = 8 % (*б*), e = 26 % (*в*)

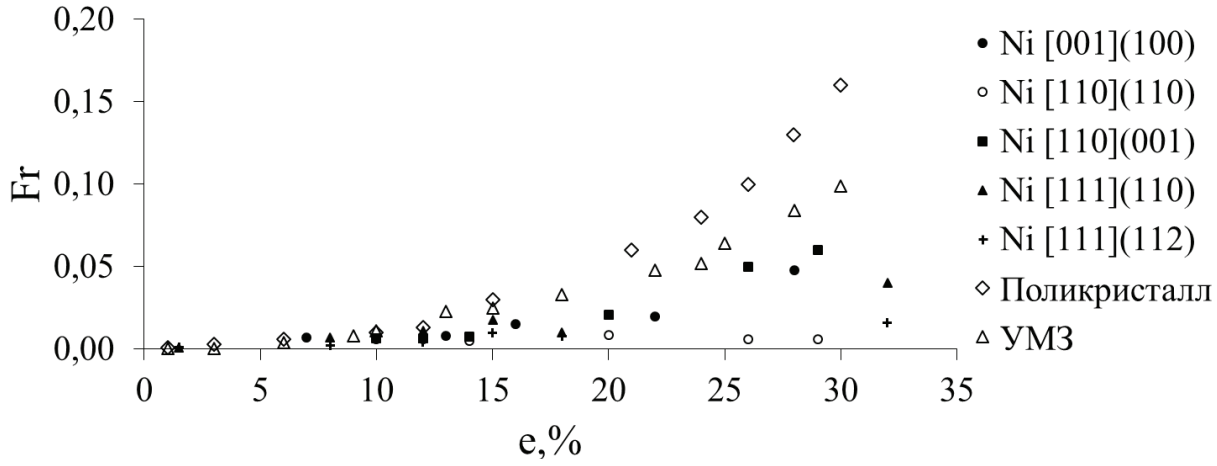


Рис. 3. Фактор шероховатости

Fig. 3. Roughness factor

Экспоненциальная зависимость фактора шероховатости от степени деформации описана в работе [22] на поликристаллах алюминия и титана.

Коэффициент асимметрии *Ssk* оценивает асимметрию распределения высоты рассматриваемой поверхности. Если правый хвост распределения длиннее левого, то показатель *Ssk* положительный. В этом случае на поверхности преобладают высокие пики, которые выделяются из среднего. В противном случае *Ssk* отрицательный, и поверхность имеет четкие глубокие впадины (концентраторы напряжений) и гладкие протяженные плато. Таким образом, коэффициент асимметрии показывает, что преобладает в профиле – выступы или впадины. С технической точки зрения важно, что отрицательная асимметрия характерна для поверхности с хорошими опорными свойствами, в то же время отрицательная асимметрия характерна и для поверхностей с глубокими впадинами, что может приводить к зарождению трещин.

В рассматриваемых случаях отрицательное значение коэффициента асимметрии было установлено для поликристаллического агрегата после достижения деформации 20 % (рис. 4).

Рассмотрение профилей поперечного сечения деформированных поверхностей (рис. 5) позволяет заметить качественное различие в профилях. Наибольшее количество и более острые впадины характерны для поликристаллов, особенно при увеличении степени деформации.

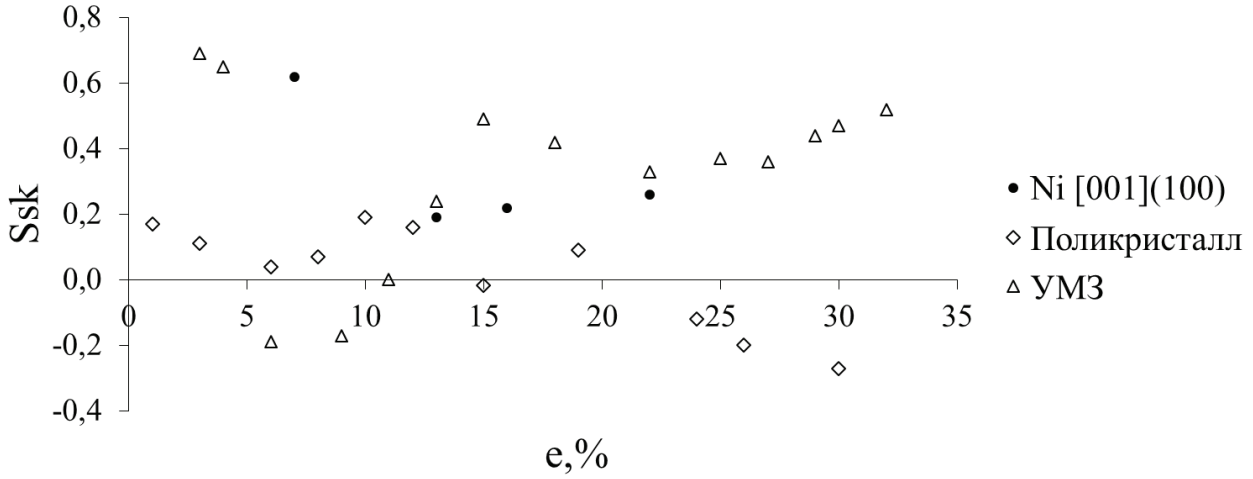


Рис. 4. Коэффициент асимметрии

Fig. 4. Asymmetry coefficient

При увеличении степени деформации величина среднего квадратичного значения высоты поверхности ограниченного масштаба *Sq* для монокристаллов всех рассмотренных кристаллографических ориентаций постепенно возрастает (рис. 6). При этом нет большого различия между кристаллическими ориентациями. Несколько более интенсивный рост можно отметить для ориентаций [111] (110) и [001] (100) при степенях деформации более 20 %. Данный факт связан с тем, что для этих случаев характерно формирование на гранях макрополос деформации и пачек следов сдвига соответственно [23]. Эти элементы деформационного рельефа локализуются на поверхности кристалла, и разница высот рельефа внутри них и в близлежащей области дает повышения значений *Sq*.

Величина *Sq* для поликристаллического никеля при увеличении степени деформации растет отличающимся от монокристаллов образом (рис. 6). Рост может быть описан экспоненциальной кривой $y = 0{,}4e^{0{,}12x}$ при $R^2 = 0{,}93$. Величина *Sq* для поликристаллического агрегата на начальных этапах близка к значениям для монокристаллов, но после $e = 15$ % она начинает значительно превышать их. Это хорошо согласуется с данными о том, что пластическая деформация в поликристалле протекает за счет кристаллографического скольжения внутри зерен и межзеренного скольжения. На начальных этапах превалирует первый механизм, а далее задействуется межзеренное скольжение и поворот.

На рис. 2 показан профиль сечения поверхности по границе зерен. Видно, что при $e = 8$ % перепад высот довольно близок к величине *Sq*, однако при достижении $e = 26$ % перепад увеличивается. Вместе с тем с точки зрения разрушения материала более интересен (и неблагоприятен) тот факт, что граница между зернами становится более резкая, т. е. развивается несовместность протекания пластической деформации, и границы зерен могут быть местами зарождения трещин. В данном случае необходимо отметить, что такой или иной сценарий (отсутствие резкой границы и перепада высот между соседними зернами) развития пластической деформации обусловлен кристаллографической ориентацией соседних зерен. В работе [12] экспериментально показано, что определяющим фактором для локализации деформации является кристаллическая разориентация соседних зерен.

Данные результаты могут быть полезны при выборе текстуры материала при изготовлении деталей машин.

Величина *Sq* для материала в УМЗ-состоянии близка к значениям для монокристаллов (рис. 6). Однако деформационный рельеф значительно от них отличается (см. рис. 1), а также можно видеть качественное отличие в соответствующих профилях поперечного сечения (см. рис. 5). Этот факт можно связать с механизмами деформации. Механизмы деформации для моно- и поликристаллов обсуждались выше, здесь же необходимо добавить

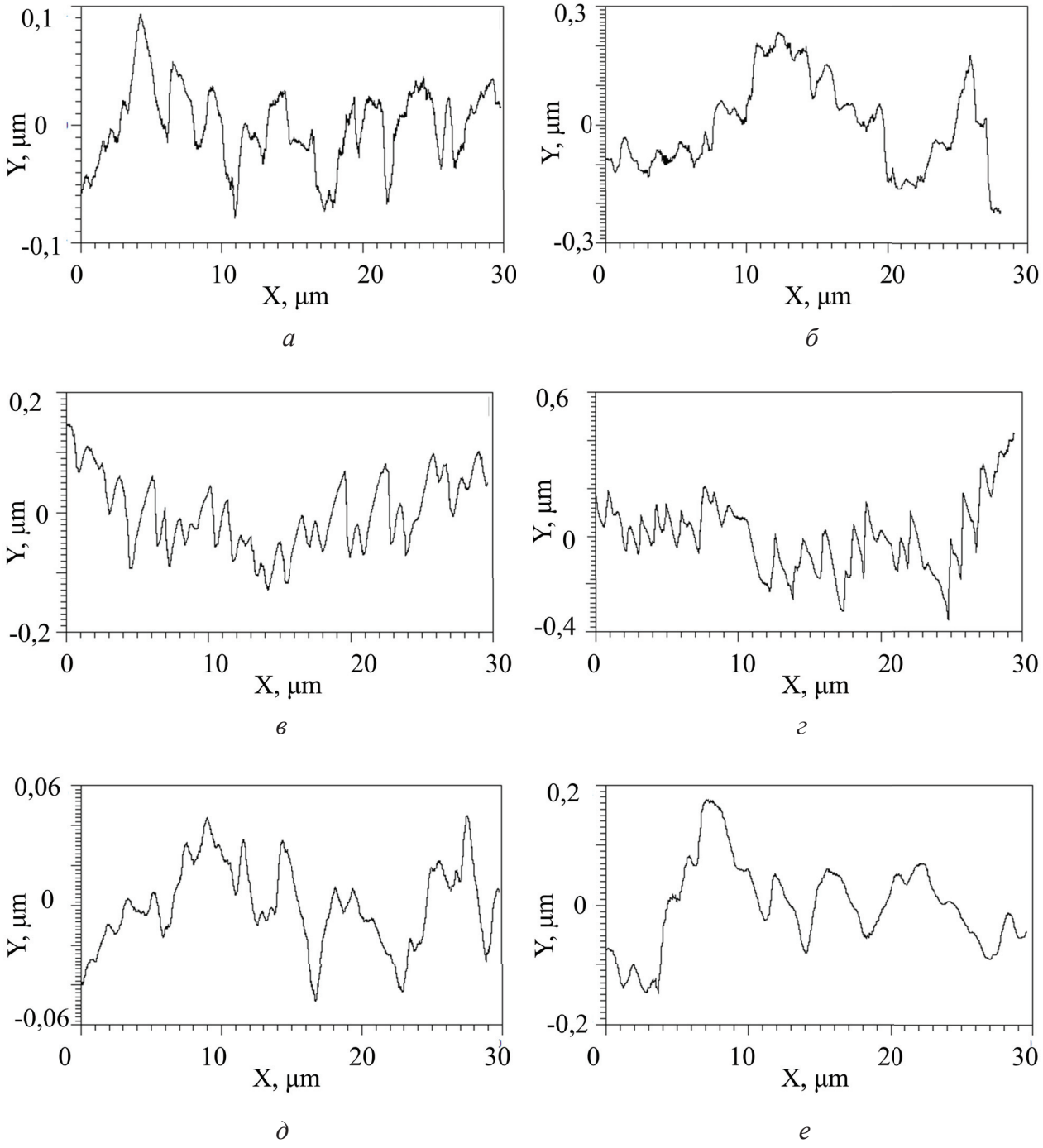


Рис. 5. Профиль поверхности после e = 7 % (*а*, *в*, *д*); e = 27 % (*б*, *г*, *е*); [001] – монокристалл (*а*, *б*); поликристалл (*в*, *г*); УМЗ-состояние (*д*, *е*)

Fig. 5. The surface profile after e = 7 % (*а*, *в*, *д*); e = 27 % (*б*, *г*, *е*); [001] – single crystal (*а*, *б*); polycrystal (*в*, *г*); ECAP state (*д*, *е*)

сведения, касающиеся УМЗ-состояния. Для УМЗ-материалов, полученных РКУП, преобладающим механизмом деформации является зернограничное скольжение (ЗГС), а также и скольжение внутризеренных дислокаций. Валиев Р.З. с соавторами [24] говорит о том, что оценка вклада ЗГС в общую деформацию достигает 25 %. В работах [25, 26] вклад ЗГС для УМЗ-алюминия был оценен на уровне 40…70 %. В работе [27] формирование микрополос сдвига в УМЗ-сплаве Al6082 связывают с действием механизма зернограничного скольжения. Однако авторы работы [27] предлагают модель, в которой ЗГС развивается

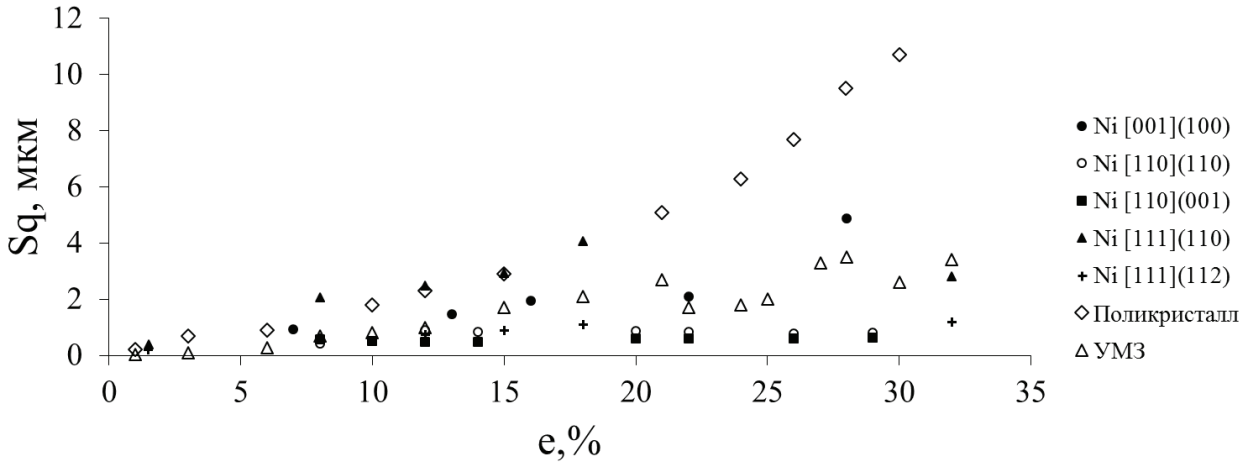


Рис. 6. Среднее квадратичное значение высоты
Fig. 6. Height root mean square value

только на начальных стадиях деформации, при дальнейшем нагружении структурные изменения в материале ограничивают ЗГС.

Выводы

Установлено и количественно подтверждено влияние внутренней структуры материала на морфологию поверхности в процессе нагружения.

Показана потенциальная возможность применения трехмерных параметров шероховатости для оценки ресурса материала и выявления возможного зарождения концентраторов напряжений на поверхности. Отрицательное значение асимметрии поверхности (*Ssk*) свидетельствует о наличии острых впадин на поверхности, что характерно для поликристаллов при достижении степени деформации 20 %.

Различия в деформационных механизмах монокристаллов (скольжение по октаэдрическим плоскостям), поликристаллов (внутризеренное и зернограничное скольжение) и материалов в УМЗ-состоянии (зернограничное скольжение) отражается в показателях шероховатости деформированной поверхности. Величина среднего квадратичного значения высоты *Sq* для поликристаллического агрегата на начальных этапах близка к значениям для монокристаллов и материалов в УМЗ-состоянии, но при достижении e = 15…20 % превышает их в два раза, а при достижении e = 30 % – в четыре раза.

Изменение фактора шероховатости *Fr* с увеличением степени деформации подчиняется экспоненциальному закону для $y = 0{,}002e^{0{,}16x}$, – для поликристаллов, $y = 0{,}001e^{0{,}17x}$ – для материалов в УМЗ-состоянии. Для монокристаллов *Fr* не превышает значения 0,05 во всем рассмотренном интервале нагружения.

Полученные в работе результаты расширяют фундаментальные знания о влиянии внутренней структуры материала на процессы деформации. Они могут быть использованы для математического моделирования поведения металлов под нагрузкой.

Список литературы

1. The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands / H.S. Ho, M. Risbet, X. Feaugasb, G. Moulin // Scripta Materialia. – 2011. – Vol. 65, iss. 11. – P. 998–1001. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.001.

2. Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining / D. Raabe, M. Sachtleber, H. Weiland, G. Scheele // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51. – P. 1539–1560. – DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00557-8.

3. Extrusions and intrusions in fatigued metals. Pt. 2. AFM and EBSD study of the early growth of extrusions and intrusions in 316L steel fatigued at room temperature / J. Man, P. Klapetek, O. Man, A. Weidner, K. Obrtlı´k, J. Pola´k // Philosophical Magazine. – 2009. – Vol. 89, iss. 16. – P. 1337–1372. – DOI: 10.1080/14786430902917624.

4. AFM and SEM-FEG study on fundamental mechanisms leading to fatigue crack initiation / J. Man, M. Valtr, M. Petrenec, J. Dluhoš, I. Kube˘na,

K. Obrtlík, J. Polák // International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 76. – P. 11–18. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.019.

5. *Meng B., Fu M.W.* Size effect on deformation behavior and ductile fracture in microforming of pure copper sheets considering free surface roughening // Materials and Design. – 2015. – Vol. 83. – P. 400–412. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.067.

6. *Sangid M.D., Maier H.J., Sehitoglu H.* A physically based fatigue model for prediction of crack initiation from persistent slip bands in polycrystals // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59, iss. 1. – P. 328–341. – DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.036.

7. Atypical "boomerang" slip traces in [001] niobium single crystals deformed at room temperature / D.S.H. Charrier, J. Bonneville, C. Coupeau, Y. Nahas // Scripta Materialia. – 2012. – Vol. 66, iss. 7. – P. 475–478. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.12.019.

8. A comparison of collective dislocation motion from single slip quantitative topographic analysis during in-situ AFM room temperature tensile tests on Cu and Feα crystals / C. Kahloun, G. Monnet, S. Queyreau, L.T. Le, P. Franciosi // International Journal of Plasticity. – 2016. – Vol. 84. – P. 277–298. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.06.002.

9. Topological analysis of {110} slip in an alpha-iron crystal from in situ atomic force microscopy / C. Kahloun, L.T. Le, G. Monnet, M.-H. Chavanne, E. Ait, P. Franciosi // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61, iss. 17. – P. 6459–6465. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.07.023.

10. *Kramer D.E., Savage M.F., Levine L.E.* AFM observations of slip band development in Al single crystals // Acta Materialia. – 2005. – Vol. 53, iss. 17. – P. 4655–4664. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.06.019.

11. The Evolution of slip morphology and fatigue crack initiation in surface grains of Ni200 / K.S. Chan, J.W. Tian, B. Yang, P.K. Liaw // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2009. – Vol. 40, iss. 11. – P. 2545–2556. – DOI: 10.1007/s11661-009-9980-4.

12. The fundamental relationships between grain orientation, deformation-induced surface roughness and strain localization in an aluminum alloy / M.R. Stoudt, L.E. Levine, A.Creuzigera, J.B. Hubbard // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 530, iss. 1. – P. 107–116. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.09.050.

13. Investigating the relationship between grain orientation and surface height changes in nickel polycrystals under tensile plastic deformation / K. Balusu, R. Kelton, E.I. Meletis, H. Huang // Mechanics of Materials. – 2019. – Vol. 134. – P. 165–175. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.04.011.

14. Microstructure and mechanical properties of Cu and Cu-Zn alloys produced by equal channel angular pressing / Z.J. Zhang, Q.Q. Duan, X.H. An, S.D. Wu, G. Yang, Z.F. Zhang // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 528. – P. 4259–4267. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.080.

15. Effects of dislocation slip mode on high-cycle fatigue behaviors of ultrafine-grained Cu-Zn alloy processed by equal-channel angular pressing / Z.J. Zhang, X.H. An, P. Zhang, M.X. Yang, G. Yang, S.D. Wu, Z.F. Zhang // Scripta Materialia. – 2013. – Vol. 68. – P. 389–392. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.10.036.

16. *Mousavi S.E., Meratian M., Rezaeian A.* Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing // Journal of Materials Science. – 2017. – Vol. 52. – P. 8041–8051. – DOI: 10.1007/s10853-017-1006-9.

17. Characteristic features of physical and mechanical properties of ultrafine-grained Al–Mg alloy 1560 / V.A. Krasnoveikin, A. Kozulin, V.A. Skripnyak, E.N. Moskvichev, D.V. Lychagin // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, iss. 9. – P. 389–392. – DOI: 10.1134/S2075113318020168.

18. Sliding wear behavior of submicrocrystalline pure iron produced by high-pressure torsion straining / H. Kato, Y. Todaka, M. Umemoto, M. Haga, E. Sentoku // Wear. – 2015. – Vol. 336–337. – P. 58–68. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.014.

19. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation / A.P. Zhilyaev, I. Shakhova, A. Belyakov, R. Kaibyshev, T.G. Langdon // Wear. – 2013. – Vol. 305. – P. 89–99. – DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.001.

20. ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Ч. 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М.: Стандартинформ, 2015. – 47 с.

21. *Lychagin D.V., Alfyorova E.A.* Slip as the basic mechanism for formation of deformation relief structural elements // Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59, iss. 7. – P. 1433–1439. – DOI: 10.1134/S1063783417070137.

22. Micromechanical model of deformation-induced surface roughening in polycrystalline materials / V.A. Romanova, R. Balokhonov, A. Panin, M.S. Kazachenok, V.S. Shakhijanov // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 13, iss. 3. – P. 324–333. – DOI: 10.1134/S1029959917030080.

23. *Alfyorova E.A., Lychagin D.V.* Self-organization of plastic deformation and deformation relief in FCC single crystals // Mechanics of Materials. – 2018. –

Vol. 117. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.11.011.

24. Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper / R.Z. Valiev, E.V. Kozlov, Yu.F. Ivanov, J. Lian, A.A. Nazarov, B. Baudelet // Acta Metallurgica et Materialia. – 1994. – Vol. 42. – P. 2467–2475. – DOI: 10.1016/0956-7151(94)90326-3.

25. Flow processes at low temperatures in ultrafine-grained aluminum / N.Q. Chinh, P. Szommera, T. Csanádia, T.G. Langdon // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 434, iss. 1–2. – P. 326–334. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.014.

26. Experimental evidence for grain-boundary sliding in ultrafine-grained aluminum processed by severe plastic deformation / N.Q. Chinh, P. Szommera, Z. Horita, T.G. Langdon // Advanced Materials. – 2006. – Vol. 18, iss. 1. – P. 34–39. – DOI: 10.1002/adma.200501232.

27. Tensile deformation of an ultrafine-grained aluminium alloy: micro shear banding and grain boundary sliding / I. Sabirov, Y. Estrin, M.R. Barnett, I. Timokhina, P.D. Hodgson // Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56. – P. 2223–2230. – DOI: 10.1016/j.actamat.2008.01.020.

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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 90–101
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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

Influence of the Material Structure on the Deformed Surface Morphology

Ekaterina Alfyorova [1, a], *Andrey Filippov* [2, b]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation
[2] Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0001-9579-6870, katerina525@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-0487-8382, andrey.v.filippov@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 24 October 2019
Revised: 27 December 2019
Accepted: 20 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Surface morphology
Deformation
Three-dimensional roughness parameters
Single crystals
Polycrystals
Ultrafine-grained metals
Microstructure

Funding
The results were obtained with financial support from Fundamental Research Program of State Academies of Sciences for 2013-2020 (project No III.23.2.4). The research is supported by Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

Acknowledgements
The authors thank Professor D. Lychagin for the samples of single crystals.

ABSTRACT

Introduction. Morphological changes in the free surface of materials during loading are interesting from a fundamental and practical point of view. In the first case, through the deformation relief, scientists judge the processes taking place inside the material, identify the deformation mechanisms, analyze the change in the stress-strain state, etc. In the second case, the deformation relief is an undesirable phenomenon, because it worsens fatigue resistance, adhesion, leads to cracking and reduces other physical and mechanical properties of machine parts. In addition, on the basis of the deformation relief, scientists try to evaluate the residual life of the machine parts. Today, industry uses materials in various structural conditions. The microstructure of the metal (the presence or absence of grains and grain boundaries, grain size, texture, crystallographic orientation, etc.) has a significant effect on the nature of the course of plastic deformation and the morphology of the deformed surface. **The purpose of the work** is to study the influence of the material structure on the evolution of the surface morphology during deformation. For this purpose, nickel samples in a single-crystal, polycrystalline, and ultrafine-grained state are investigated. **The methods of investigation** are mechanical compression tests, confocal laser scanning microscopy. Quantification is carried out using standardized three-dimensional roughness parameters. **Results and Discussion**. The paper shows the influence of the internal structure of the material on the evolution of the morphology of the deformation surface. Changes in the strain relief are discussed in terms of the prevailing strain mechanisms for each structural state of the material. It is shown that using three-dimensional roughness parameters, one can evaluate the presence of potential stress concentrators on the surface. It is determined that the presence of deep sharp depressions is most inherent in the material in a polycrystalline state. The results of the work can be useful for a reasoned choice of the microstructure of the material in the manufacture of machine parts and for mathematical modeling of the behavior of metals under load

For citation: Alfyorova E.A., Filippov A.V. Influence of the Material Structure on the Deformed Surface Morphology. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 90–101. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101. (In Russian).

*** Corresponding author**
Alfyorova Ekaterina A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Avenue,
634050, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7-909-547-1201, **e-mail:** katerina525@mail.ru

References

1. Ho H.S., Risbet M., Feaugasb X., Moulin G. The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 65, iss. 11, pp. 998–1001. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.001.

2. Raabe D., Sachtleber M., Weiland H., Scheele G. Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 1539–1560. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00557-8.

3. Man J., Klapetek P., Man O., Weidner A., Obrtlı´k K., Pola´k J. Extrusions and intrusions in fatigued metals. Pt. 2. AFM and EBSD study of the early growth of extrusions and intrusions in 316L steel fatigued at room temperature. *Philosophical Magazine*, 2009, vol. 89, iss. 16, pp. 1337–1372. DOI: 10.1080/14786430902917624.

4. Man J., Valtr M., Petrenec M., Dluhoš J., Kube˘na I., Obrtlík K., Polák J. AFM and SEM-FEG study on fundamental mechanisms leading to fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue*, 2015, vol. 76, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.019.

5. Meng B., Fu M.W. Size effect on deformation behavior and ductile fracture in microforming of pure copper sheets considering free surface roughening. *Materials and Design*, 2015, vol. 83, pp. 400–412. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.067.

6. Sangid M.D., Maier H.J., Sehitoglu H. A physically based fatigue model for prediction of crack initiation from persistent slip bands in polycrystals. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, iss. 1, pp. 328–341. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.036.

7. Charrier D.S.H., Bonneville J., Coupeau C., Nahas Y. Atypical “boomerang” slip traces in [001] niobium single crystals deformed at room temperature. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 66, iss. 7, pp. 475–478. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.12.019.

8. Kahloun C., Monnet G., Queyreau S., Le L.T., Franciosi P. A comparison of collective dislocation motion from single slip quantitative topographic analysis during in-situ AFM room temperature tensile tests on Cu and Feα crystals. *International Journal of Plasticity*, 2016, vol. 84, pp. 277–298. DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.06.002.

9. Kahloun C., Le L.T., Monnet G., Chavanne M.-H., Ait E., Franciosi P. Topological analysis of {110} slip in an alpha-iron crystal from in situ atomic force microscopy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, iss. 17, pp. 6459–6465. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.07.023.

10. Kramer D.E., Savage M.F., Levine L.E. AFM observations of slip band development in Al single crystals. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, iss. 17, pp. 4655–4664. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.06.019.

11. Chan K.S., Tian J.W., Yang B., Liaw P.K. The Evolution of slip morphology and fatigue crack initiation in surface grains of Ni200. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2009, vol. 40, iss. 11, pp. 2545–2556. DOI: 10.1007/s11661-009-9980-4.

12. Stoudt M.R., Levine L.E., Creuzigera A., Hubbard J.B. The fundamental relationships between grain orientation, deformation-induced surface roughness and strain localization in an aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 530, iss. 1, pp. 107–116. DOI: 10.1016/j.msea.2011.09.050.

13. Balusu K., Kelton R., Meletis E.I., Huang H. Investigating the relationship between grain orientation and surface height changes in nickel polycrystals under tensile plastic deformation. *Mechanics of Materials*, 2019, vol. 134, pp. 165–175. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.04.011.

14. Zhang Z.J., Duan Q.Q., An X.H., Wu S.D., Yang G., Zhang Z.F. Microstructure and mechanical properties of Cu and Cu-Zn alloys produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, pp. 4259–4267. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.080.

15. Zhang Z.J., An X.H., Zhang P., Yang M.X., Yang G., Wu S.D., Zhang Z.F. Effects of dislocation slip mode on high-cycle fatigue behaviors of ultrafine-grained Cu-Zn alloy processed by equal-channel angular pressing. *Scripta Materialia*, 2013, vol. 68, pp. 389–392. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.10.036.

16. Mousavi S.E., Meratian M., Rezaeian A. Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 8041–8051. DOI: 10.1007/s10853-017-1006-9.

17. Krasnoveikin V.A.. Kozulin A., Skripnyak V.A., Moskvichev E.N., Lychagin D.V. Characteristic features of physical and mechanical properties of ultrafine-grained Al–Mg alloy 1560. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, iss. 9, pp. 389–392. DOI: 10.1134/S2075113318020168.

18. Kato H., Todaka Y., Umemoto M., Haga M., Sentoku E. Sliding wear behavior of submicrocrystalline pure iron produced by high-pressure torsion straining. *Wear*, 2015, vol. 336–337, pp. 58–68. DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.014.

19. Zhilyaev A.P., Shakhova I., Belyakov A., Kaibyshev R., Langdon T.G. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation. *Wear*, 2013, vol. 305, pp. 89–99. DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.001.

20. State Standard 25178-2–2014. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameter. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 47 p. (In Russian).

21. Lychagin D.V., Alfyorova E.A. Slip as the basic mechanism for formation of deformation relief structural elements. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, iss. 7, pp. 1433–1439. DOI: 10.1134/S1063783417070137.

22. Romanova V.A., Balokhonov R., Panin A., Kazachenok M.S., Shakhijanov V.S. Micromechanical model of deformation-induced surface roughening in polycrystalline materials. *Physical Mesomechanics*, 2017, vol. 13, iss. 3, pp. 324–333. DOI: 10.1134/S1029959917030080.

23. Alfyorova E.A., Lychagin D.V. Self-organization of plastic deformation and deformation relief in FCC single crystals. *Mechanics of Materials*, 2018, vol. 117, pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.11.011.

24. Valiev R.Z., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Lian J., Nazarov A.A., Baudelet B. Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, vol. 42, pp. 2467–2475. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90326-3.

25. Chinh N.Q., Szommera P., Csanádia T., Langdon T.G. Flow processes at low temperatures in ultrafine-grained aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 434, iss. 1–2, pp. 326–334. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.014.

26. Chinh N.Q., Szommera P., Horita Z., Langdon T.G. Experimental evidence for grain-boundary sliding in ultrafine-grained aluminum processed by severe plastic deformation. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, iss. 1, pp. 34–39. DOI: 10.1002/adma.200501232.

27. Sabirov I., Estrin Y., Barnett M.R., Timokhina I., Hodgson P.D. Tensile deformation of an ultrafine-grained aluminium alloy: micro shear banding and grain boundary sliding. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, pp. 2223–2230. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.01.020.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 102–113
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние структурного состояния коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество поверхности после точения

Николай Шамарин [1, a, *], ***Андрей Филиппов*** [1, b], ***Сергей Тарасов*** [1, 2, c], ***Олег Подгорных*** [2, d], ***Вероника Утяганова*** [1, e]

[1] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия
[2] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-4649-6465, shnn@ispms.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-0487-8382, avf@ispms.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0003-0702-7639, tsy@ispms.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-7758-9242, podgornysh.o.a@mail.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-2303-8015, filaret_2012@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.1

История статьи:
Поступила: 14 декабря 2019
Рецензирование: 30 декабря 2019
Принята к печати: 07 февраля 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Коррозионно-стойкая сталь
Интенсивная пластическая деформация
Точение
Микрогеометрия поверхности

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-00058). Структурные исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие и постоянное совершенствование методов, технологии и оснастки для осуществления интенсивных пластических деформаций (ИПД) способствует снижению затрат на производство ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, обладающих улучшенными физико-механическими свойствами. Благодаря этому такие материалы становятся более доступными для применения в серийном производстве различных изделий. Одним из самых распространенных методов получения готовых металлических изделий является обработка резанием, в частности точением. Однако на данный момент существует недостаток информации о влиянии структурного состояния УМЗ-материалов на качественные характеристики обработанной поверхности. **Цель работы:** исследование влияния структурного состояния, сформированного методами ИПД, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество механической обработки её поверхности при точении. **В работе исследованы** образцы из сплава 12Х18Н10Т в состоянии поставки и после структурообразования с применением современного металлорежущего инструмента и оборудования, а также рекомендуемых режимов резания. **Методами исследования** являются механические испытания на сжатие и растяжение, просвечивающая электронная микроскопия, оптическая металлография, лазерная сканирующая микроскопия. **Результаты и обсуждение**. На основе полученных экспериментальных результатов можно заключить, что ИПД является действенным способом повышения качества механической обработки поверхности при точении хромоникелевой коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н10Т. В частности, структурообразование методами ИПД приводит к значительному (в 1,14…1,9 раза) снижению параметра шероховатости *Sa* и еще более существенному (в 1,33…4,4 раза) снижению параметра *Sz*. При этом АВС-прессование с последующей прокаткой является более эффективным методом ИПД для обеспечения наилучшего соотношения качества обработки и высокой механической прочности. Полученные результаты указывают на большой потенциал использования изделий из объемных УМЗ-материалов в промышленности за счет возможности сочетания в них высоких механических свойств и качества механической размерной обработки. Полученные данные могут быть применены при проектировании технологических процессов механической обработки коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т с ультрамелкозернистой структурой в условиях серийного машиностроительного производства.

Для цитирования: Влияние структурного состояния коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество поверхности после точения / Н.Н. Шамарин, А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, О.А. Подгорных, В.Р. Утяганова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 102–113. – DOI:10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113.

Введение

Применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД) для изготовления ответственных изделий и конструкций становится современной тенденцией в связи с исчерпанием традиционных возможностей упрочнения сплавов и необходимостью увеличения удельной

***Адрес для переписки**
Шамарин Николай Николаевич, м.н.с.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
пр. Академический, 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (905) 079-07-29, **e-mail:** shnn@ispms.ru

прочности и эксплуатационной надежности металлических материалов. Расширение круга материалов, механические свойства которых могут быть улучшены с применением ИПД, является актуальной задачей материаловедения.

Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали широко распространены в машино- и судостроении, химической и пищевой промышленности. В зависимости от соотношения количеств аустенито- и ферритообразующих легирующих элементов кристаллизация этих сталей идет по механизму аустенит-феррит или феррит-аустенит, поэтому эти стали могут быть аустенитными или двухфазными аустенитно-ферритными. Аустенитные стали проявляют склонность к быстрому деформационному упрочнению, и поэтому проведение ИПД связано с известными трудностями. Тем не менее повышение прочности этих сталей за счет формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации представляется возможным [1–4]. Связанное с этим изменение структурного состояния и механических свойств может существенно повлиять на обрабатываемость стали резанием.

Обрабатываемость резанием материалов с УМЗ-структурой является предметом изучения как отечественных, так и зарубежных исследователей. В качестве исследуемых материалов наиболее часто рассматриваются технически чистый титан [5] и сплавы на его основе [6], медь [7], малоуглеродистые стали [8, 9], магниевые [10], алюминиевые [11] сплавы. При этом по отдельности или комплексно рассматриваются такие показатели обрабатываемости резанием, как составляющие силы резания, шероховатость обработанной поверхности и твердость приповерхностного деформированного слоя материала, а также износостойкость инструмента. Поскольку на процесс резания помимо свойств обрабатываемого материала оказывает влияние множество факторов, таких как тип обработки (точение, сверление, фрезерование), особенности режущего инструмента, наличие или отсутствие смазочно-охлаждающей жидкости и другие, то получается, что все эти исследования выполнены при различных условиях реализации процесса резания. В связи с этим возникает неоднозначность в трактовке имеющихся результатов исследований о влиянии структурного состояния материала на его обрабатываемость резанием. Тем не менее существует необходимость учета влияния вышеуказанных факторов на качество обработки резанием при технологической подготовке производства [12–15].

Исследования качества обработки резанием на материалах с УМЗ-структурой, сформированной методами ИПД, показывают, что метод обработки существенно влияет на параметры микрогеометрии поверхности, например при точении и фрезеровании алюминиевого сплава АМг2 [16]. Так, при точении материала в УМЗ-состоянии шероховатость обработанной поверхности до семи раз меньше по сравнению с шероховатостью, полученной обработкой этого же материала с крупнокристаллической (КК) структурой [17]. В то же время при фрезеровании шероховатость поверхности УМЗ-сплава снижается только в 3,8 раза [18]. Фрезерование коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т в УМЗ-состоянии дает значения высотных параметров (*Sa* и *Sz*) шероховатости до 6,7 раз меньше, чем при фрезеровании этой же стали в исходном состоянии [19]. В настоящее время нет известных работ по изучению влияния структурного состояния на качество обработки поверхности при точении хромоникелевых коррозионно-стойких сталей.

Целью настоящей работы является исследование влияния структурного состояния, сформированного методами ИПД, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество механической обработки ее поверхности при точении.

Методика исследований

Исследовали три типа образцов. Первый тип образцов – прокат круглый с закалкой на аустенит (обозначен как «Закалка»); второй – после АВС-прессования (обозначен как «АВС»), третий – после АВС-прессования и прокатки (обозначен как «АВС + R1»). Образцы АВС получены путем осадки образца по трем координатным осям на гидравлическом прессе. Первый проход выполнен путем нагрева заготовки до 500 °С и последующего осаждения на 50 %, второй проход – при нагреве заготовки до 450 °С и осаждении на 45 %, третий проход – при нагреве заготовки до 400 °С и осаждении на 40 %.

Образцы ABC+R1 получены путем прокатки образцов толщиной 20 мм, полученных после ABC-прессования, до квадратного прутка со стороной 10 мм за пять проходов. Между проходами заготовки нагревали в печи при температуре 300 °C в течение 15 мин.

Исследование микроструктуры проводилось методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при помощи микроскопа JEM-2100 (JEOL Ltd, Japan), а также металлографии при помощи оптического микроскопа МЕТАМ ЛВ (LOMO, Russia). При проведении ПЭМ-исследований использовались режимы получения светлопольных изображений и микродифракционных картин (SAED).

Тесты на сжатие и растяжение осуществлялись на испытательной машине Testsystems 110M-10 (testsystems, Russia) при комнатной температуре.

Твердость определена с помощью нанотвердомера CSM Nano Hardness Tester (CSM Instruments, USA).

Полученные после ИПД обработки образцы в виде цилиндрических заготовок подвергались точению на токарном станке OKUMA ES-L8II-M (Okuma Corp., Japan). Обтачивалась торцевая поверхность заготовок с КК и УМЗ-структурой. Частота вращения шпинделя 4000 об/мин. В процессе испытаний варьировались глубина резания и подача (табл. 1). Использовался проходной резец со сменной многогранной пластиной фирмы Korloy Inc. (Korea), маркировка – CCGT 120408-AR. Обработка осуществлялась без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Таблица 1

Table 1

Режимы резания

The cutting modes

Номер режима	Подача, мм/об	Глубина резания, мм
Mode number	Feed, mm/rev	Cutting depth, mm
1	0,07	0,4
2	0,07	0,8
3	0,15	0,4
4	0,15	0,8
5	0,15	1,6
6	0,25	0,8
7	0,25	1,6

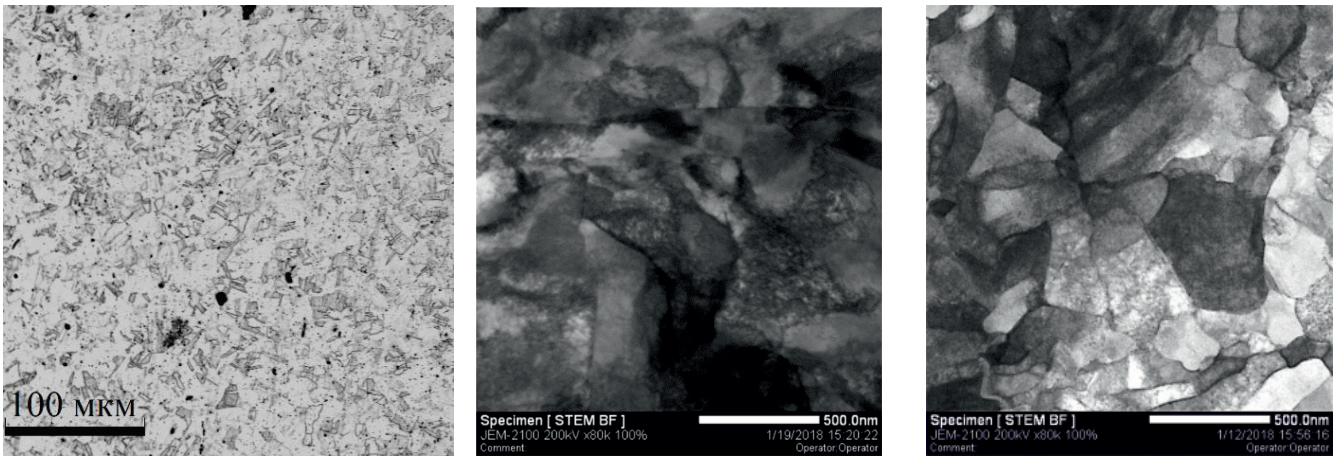
Оценка параметров рельефа обработанной резанием поверхности проводилась с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus OLS 4100 (Olympus, Japan).

Результаты и их обсуждение

Микроструктура образца после закалки представлена мелкими зернами со средним размером ~15 ± 5 мкм (рис. 1, *а*). Также наблюдаются карбиды TiCN. После ABC-прессования структура материала может быть охарактеризована, как дискретно-разориентированная полосовая (рис. 1, *б*). После ABC-прессования и прокатки сформирована равноосная ультрамелкозернистая структура со средним размером зерна 400 ± 200 нм (рис. 1, *в*).

Механические свойства исследуемых образцов приведены в табл. 2. После закалки сталь 12Х18Н10Т обладает наименьшей прочностью из рассматриваемых образцов, но наибольшей пластичностью. После ABC-прессования условный предел текучести возрастает примерно в 2,7 раза, а предел прочности примерно в 1,5 раза по сравнению с образцом в закаленном состоянии. При этом пластичность снижается в ~1,85 раза, а твердость повышается в ~1,26 раза. После ABC-прессования и прокатки условный предел текучести возрастает в ~3,1 раза, а предел прочности – в ~2,1 раза по сравнению с образцом в закаленном состоянии. При этом пластичность снижается в ~1,9 раза, а твердость повышается в ~1,3 раза. Повышение прочности материала является закономерным эффектом изменения размеров зерна за счет интенсивной пластической деформации и подчиняется широко известному соотношению Холла–Петча, исходя из которого следует, что чем меньше размер зерна, тем выше прочность материала. В свою очередь, твердость сильно зависит от условий формирования структуры материала. Так как в рассматриваемом случае процесс ИПД сопровождался нагревом материала перед прессованием и прокаткой, то это способствовало снижению остаточных напряжений и соответственно невысоким значениям нанотвердости в материалах с измельченной структурой.

При точении образцов в закаленном состоянии на обработанной поверхности формируются локальные области с налипшим материалом



а *б* *в*

Рис. 1. Микроструктура стали 12Х18Н10Т после закалки (*а*); АВС-прессования (*б*); АВС-прессования и прокатки (*в*)

Fig. 1. The microstructure of AISI321 steel after quenching (*a*, optical microscopy); ABC pressing (*б*, TEM image); ABC pressing and rolling (*в*, TEM image)

Таблица 2
Table 2

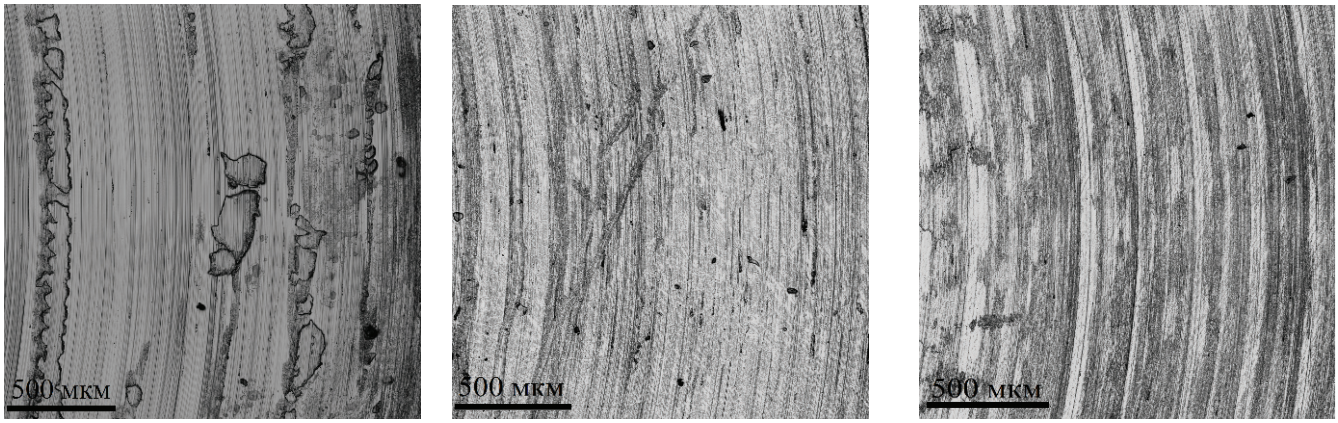
Механические свойства образцов
The mechanical properties of samples

Состояние образца	Условный предел текучести при сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %	Твердость, HV
Sample Condition	Yield offset under compression, MPa	Tensile Strength, MPa	Elongation at Tension,%	Hardness, HV
Закалка	277 ± 7	535 ± 10	61 ± 2	205 ± 2
АВС	741 ± 12	814 ± 12	33 ± 1,5	259 ± 3
АВС+R1	867 ± 11	1133 ± 15	32 ± 1,5	265 ± 5

(рис. 2, *а*). Это обусловлено процессами наростообразования и пластического оттеснения фрагментов микрорельефа с последующим замятием задней поверхностью режущего лезвия при следующем обороте заготовки. Налипание фрагментов материала является распространенной проблемой при обработке заготовок из данной стали в состоянии поставки (проката круглого горячекатаного).

При анализе обработанных поверхностей образцов, микроструктура которых сформирована АВС-прессованием (рис. 2, *б*), а также АВС-прессованием с последующей прокаткой (рис. 2. *в*), следов налипания материала значительно меньше, как и прочих поверхностных дефектов.

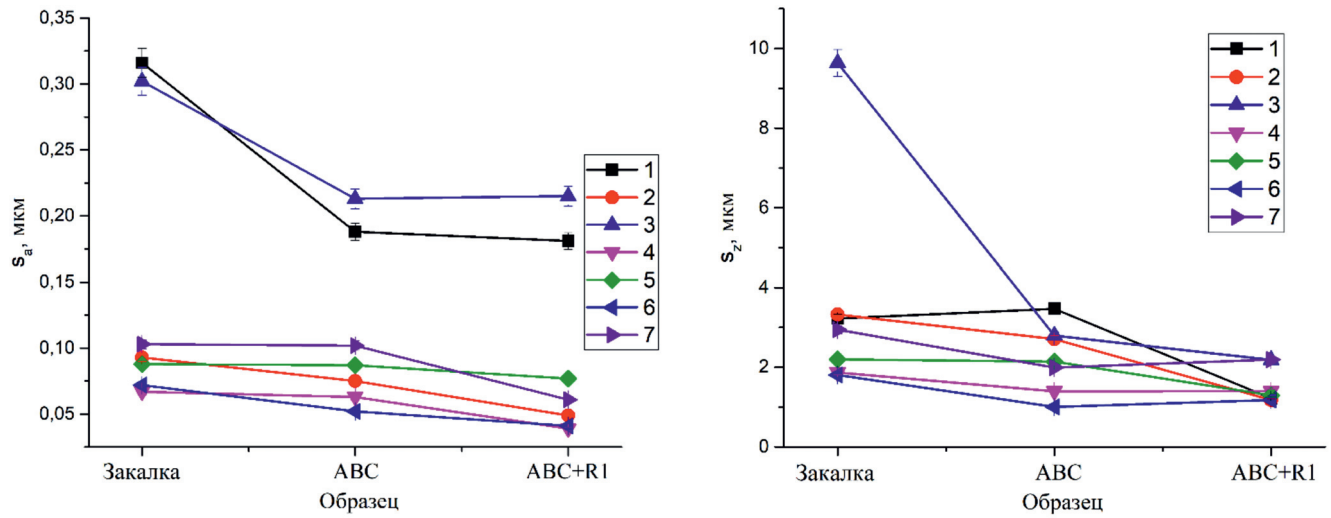
В ходе анализа профилей поверхности, обработанной при разных режимах резания, для рассматриваемых образцов были определены параметры *Sa* (рис. 3, *а*) и *Sz* (рис. 3, *б*), которые выражают среднее арифметическое и максимальное значения высот микрорельефа. Структурообразование методами ИПД приводит к значительному (в 1,14…1,9 раза) снижению параметра *Sa* и еще более существенному (в 1,33…4,4 раза) снижению параметра *Sz*. При анализе полученных значений также установлено, что АВС-прессование в большинстве рассматриваемых случаев является менее эффективным методом структурообразования, так как в меньшей степени влияет на микрогеометрию обработанной поверхности. В то же время можно



а *б* *в*

Рис. 2. Типичные изображения обработанной поверхности образцов в структурном состоянии: после закалки (*а*); АВС-прессования (*б*); АВС-прессования и прокатки (*в*)

Fig. 2. The optical images of the machined surfaces of: hardened samples (*а*); on ABC pressed samples (*б*); on ABC pressed and rolled samples (*в*)



а *б*

Рис. 3. Влияние структурного состояния стали 12Х18Н10Т на параметры Sa (*а*) и *Sz* (*б*) шероховатости обработанной поверхности при разных режимах резания

Fig. 3. The influence of the structural state of AISI 321 steel on the surface roughness parameters *Sa* (*а*) and *Sz* (*б*) as-measured for different cutting modes

утверждать, что формирование явно выраженной УМЗ-структуры после АВС-прессования и последующей прокатки приводит к существенному снижению шероховатости поверхности при обработке резанием.

Выполненные оценки указывают также на тот факт, что микрогеометрия обработанной поверхности зависит не только от структурного состояния материала, но и от режимов резания. Например, было выявлено, что наименьшее влияние структурное состояние материала оказывает на параметр *Sa* при режиме № 5 (снижение в 1,14 раза), а на *Sz* – при режиме № 4 (снижение в 1,33 раза). Наибольшее влияние изменения структурного состояния материала на параметр *Sa* установлено при режиме № 2 (снижение в 1,9 раза), а на *Sz* – при режиме № 3 (снижение в 4,4 раза).

Для лучшего понимания влияния режимов резания на качество обработки рассматривае-

мых образцов выполнена оценка влияния изменения глубины резания (рис. 4) и подачи (рис. 5) на параметры *Sa* и *Sz* при постоянных прочих режимах резания. Исходя из полученных зависимостей можно заключить, что изменение глубины резания приводит к нелинейному изменению параметров шероховатости поверхности. При обработке материалов в исходном состоянии и после деформации методом АВС-прессования с увеличением глубины резания шероховатость снижается. Более высокая шероховатость при точении с наименьшей глубиной резания обусловлена эффектом наростообразования. Нарост формируется из-за малой толщины срезаемого слоя.

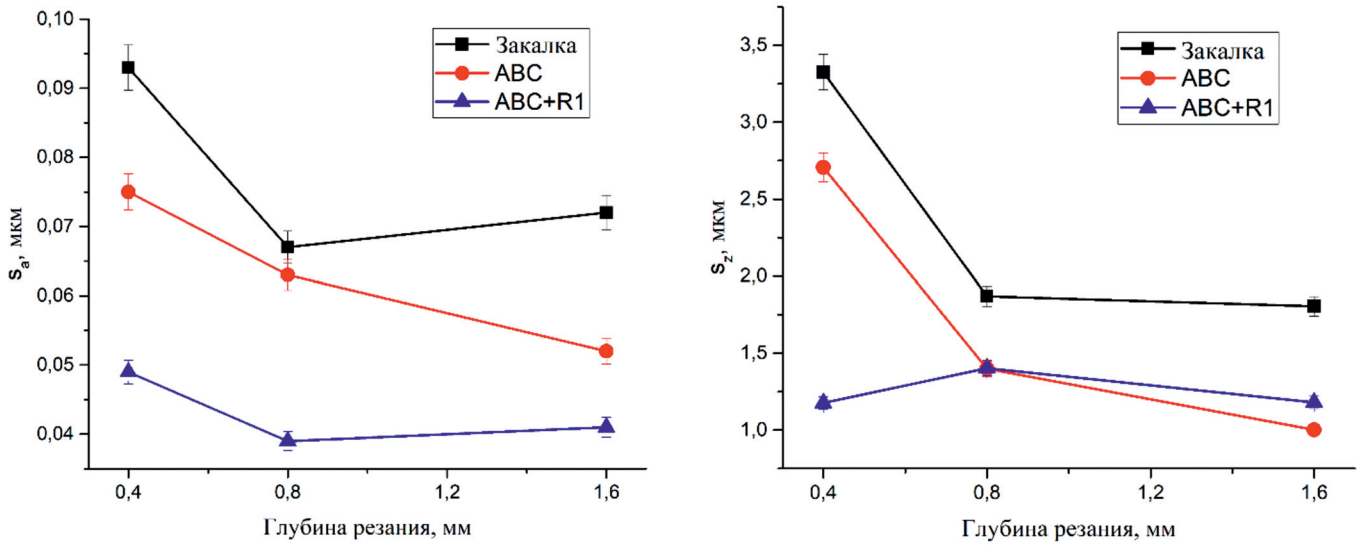
Наименьшее влияние глубина резания оказывает на параметры шероховатости при обработке стали в УМЗ состоянии, сформированном путем АВС-прессования и последующей прокатки.

На основе анализа влияния изменения подачи на шероховатость обработанной поверхности можно выделить режим № 4, при котором подача составляет 0,15 мм/об. При обработке рассматриваемых материалов на данном режиме в подавляющем большинстве случаев формируется минимальная шероховатость обработанной поверхности. При наименьшей подаче (0,07 мм/об), так же как и при малой глубине резания, происходит повышение шероховатости обработанной поверхности.

Формирование микрорельефа обработанной резанием поверхности обусловлено множеством факторов, которые помимо влияния на качество обработки оказывают взаимное влияние друг на друга.

В контексте полученных в данной работе результатов можно предполагать, что снижение шероховатости обработанной поверхности может быть связано со снижением склонности к наростообразованию из-за значительного уменьшения пластичности материала. Сталь после АВС-прессования находится в сильно деформированном состоянии, но ультрамелкозернистая структура еще не сформирована в полной мере. При этом относительное удлинение при растяжении материала значительно ниже, чем у закаленного материала. Еще более «хрупкой» является сталь в УМЗ-состоянии после АВС-прессования и прокатки. Как было отмечено ранее, на обработанной поверхности образцов из стали, подвергнутой ИПД, не наблюдается следов налипания.

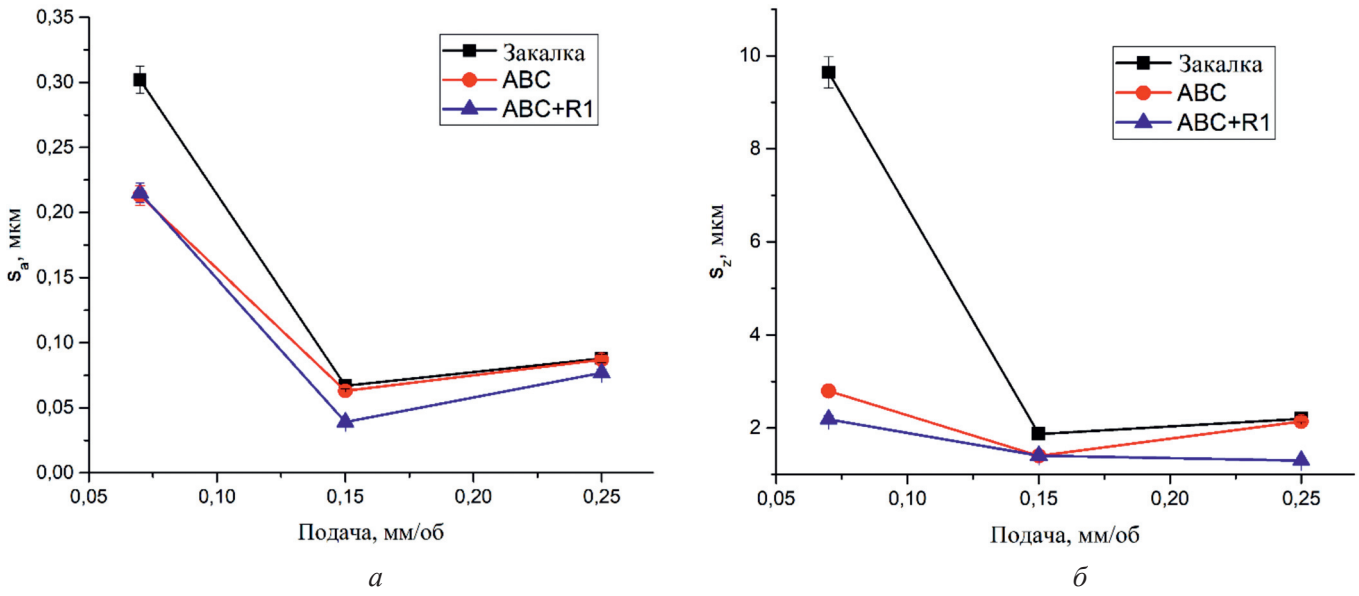
Резание сопровождается разрушением материала из-за инициации трещины в зоне стружкообразования даже в случае обработки пластич-



а *б*

Рис. 4. Влияние глубины резания на параметры *Sa* (*а*) и *Sz* (*б*) шероховатости обработанной поверхности при постоянной подаче 0,15 мм/об (режимы резания № 3–5)

Fig. 4. The effect of cutting depth on the surface roughness parameters *Sa* (*a*) and *Sz* (*б*) as-measured at constant feed 0.15 mm/rev (cutting modes No. 3–5)



а *б*

Рис. 5. Влияние подачи на параметры *Sa* (*а*) и *Sz* (*б*) шероховатости обработанной поверхности при постоянной глубине резания 0,8 мм (режимы резания № 2, 4 и 6)

Fig. 5. The effect of feed rate on the surface roughness parameters *Sa* (*a*) and *Sz* (*б*) as-measured at constant cutting depth 0.8 mm (cutting modes No. 2, 4 and 6)

ных материалов. При этом в процессе точения поверхность разрушения подвергается повторной деформации, но уже по механизму выглаживания. Происходит это при контакте задней поверхности инструмента с заготовкой. В результате микрорельеф, образованный в ходе отделения стружки, частично заглаживается. Разрушение мелкого зерна маловероятно, так как при повышенных температурах деформация УМЗ-материалов протекает по механизму зернограничного скольжения.

В ряде работ отмечается, что при формировании УМЗ-структуры снижается адгезия между задней поверхностью инструмента и заготовкой [20, 21], что также приводит к уменьшению шероховатости поверхности. Чем меньше адгезия между контактирующими поверхностями, тем меньше вероятность пластической деформации обрабатываемого материала и, как следствие, более низкая склонность к формированию «рваного» рельефа, характерного для вязкого разрушения.

Выводы

Выполнены экспериментальные исследования влияния структурного состояния коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество обработки её поверхности при точении с разными режимами резания. Структурное состояние изменялось методами интенсивной пластической деформации с целью формирования сильно деформированной и ультрамелкозернистой микроструктуры. После АВС-прессования и прокатки сформирована УМЗ-структура со средним размером зерна 400 ± 200 нм. Прочность и твердость материала в УМЗ состоянии повышаются в 2,1 и 1,3 раза соответственно по сравнению с материалом в закаленном состоянии.

На основе трехмерной оценки состояния обработанной резанием поверхности установлено, что структурообразование методами ИПД позволяет значительно снизить и даже полностью исключить формирование нароста и обратное налипание материала на поверхность стали.

Структурообразование методами ИПД приводит к значительному (в 1,14…1,9 раза) снижению параметра *Sa* и еще более существенному (в 1,33…4,4 раза) снижению параметра *Sz*. При анализе полученных значений также установлено, что АВС-прессование в большинстве рассматриваемых случаев является менее эффективным методом структурообразования, так как в меньшей степени влияет на микрогеометрию обработанной поверхности. В то же время можно утверждать, что формирование

явно выраженной УМЗ-структуры после АВС-прессования и последующей прокатки приводит к существенному снижению шероховатости поверхности.

Комплексный положительный эффект ИПД достигается за счет повышения прочности и твердости коррозионно-стойкой стали, а также улучшения качества ее обработки.

Список литературы

1. *Shintani T., Murata Y.* Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59. – P. 4314–4322. – DOI: 10.1016/j.actamat.2011.03.055.

2. Microstructure evolution in nano/submicron grained AISI 301LN stainless steel / S. Rajasekhara, L.P. Karjalainen, A. Kyröläinen, P.J. Ferreira // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527. – P. 1986–1996. – DOI: 10.1016/j.msea.2009.11.037.

3. Ultrahigh strength nano/ultrafine-grained 304 stainless steel through three-stage cold rolling and annealing treatment / G.S. Sun, L.X. Du, J. Hu, H. Xie, H.Y. Wu, R.D.K. Misra // Materials Characterization. – 2015. – Vol. 110. – P. 228–235. – DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.001.

4. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel / A. Hedayati, A. Najafizadeh, A. Kermanpur, F. Forouzan // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210, N 8. – P. 1017–1022. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010.

5. *Ning J.* Inverse determination of Johnson – Cook model constants of ultra-fine-grained titanium based on chip formation model and iterative gradient search // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 99. – P. 1131-1140. – DOI: 10.1007/s00170-018-2508-6.

6. *Chertovskikh V.* Cuttability of UFG titanium BT1-0 obtained by ECAE // Russian Engineering Research. – 2007. – Vol. 27. – P. 260–264. – DOI: 10.3103/S1068798X0705005X.

7. *Huang Y., Morehead M.* Study of machining-induced microstructure variations of nanostructured/ultrafine-grained copper using XRD // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2011. – Vol. 133. – P. 021007. – DOI: 10.1115/1.4003105.

8. Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels / A.R. Rodrigues, O. Balancin, J. Gallego, C.L.F. De Assis, H. Matsumoto, F.B. De Oliveira, S.R.D.S. Moreira, O.V. Da Silva Neto // Materials Research. – 2012. – Vol. 15. – P. 125–130. – DOI: 10.1590/S1516-14392011005000094.

9. *Assis C.L.F. de, Jasinevicius R.G., Rodrigues A.R.* Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 77. – P. 1155–1165. – DOI: 10.1007/s00170-014-6503-2.

10. Machining characteristics of fine grained AZ91 Mg alloy processed by friction stir processing / G.V.V. Surya Kiran, K.H. Krishna, S. Sameer, M. Bhargavi, B.S. Kumar, G.M. Rao, Y. Naidubabu, R. Dumpala, B.R. Sunil // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2017. – Vol. 27. – P. 804–811. – DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60092-X.

11. Mechanical properties and machinability of 6061 aluminum alloy produced by equal-channel angular pressing / Y. Bayat Asl, M. Meratian, A. Emamikhah, R. Mokhtari Homami, A. Abbasi // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2015. – Vol. 229. – P. 1302–1313. – DOI: 10.1177/0954405414535921.

12. Surface roughness evaluation after machining wear resistant hard coats / K. Monkova, P. Monka, J. Cesanek, J. Matejka, V. Duchek // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 137. – P. 03008. – DOI: 10.1051/matecconf/201713703008.

13. Study of a tap failure at the internal threads machining / P. Monka, K. Monkova, V. Modrak, S. Hric, P. Pastucha // Engineering Failure Analysis. – 2019. – Vol. 100. – P. 25–36. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.035.

14. Surface machining after deposition of wear resistant hard coats by high velocity oxygen fuel technology / K. Monkova, P. Monka, J. Matejka, M. Novak, J. Cesanek, V. Duchek, M. Urban // Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 17 (6). – P. 919–925.

15. Comparative study of chip formation in orthogonal and oblique slow-rate machining of EN 16MnCr5 steel / K. Monkova, P. Monka, A. Sekerakova, L. Hruzik, A. Burecek, M. Urban // Metals. – 2019. – Vol. 9 (6). – P. 698. – DOI: 10.3390/met9060698.

16. *Филиппов А.В., Филиппова Е.О.* Объемные ультрамелкозернистые материалы от структурообразования к формообразованию // СТИН. – 2018. – № 1. – С. 6–10.

17. Оценка 2D параметров шероховатости и волнистости поверхности после обработки резанием сплава АМг2 с ультрамелкозернистой структурой. Ч. 1. Точение / А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, Н.Н. Шамарин, О.А. Подгорных, Е.О. Филиппова // СТИН. – 2018. – № 7. – С. 20–24.

18. Оценка 2D параметров шероховатости и волнистости поверхности после обработки резанием сплава АМг2 с ультрамелкозернистой структурой. Ч. 2. Фрезерование / А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, О.А. Подгорных, Н.Н. Шамарин, Е.О. Филиппова, А.В. Воронцов // СТИН. – 2018. – № 12. – С. 32–35.

19. Влияние объемной интенсивной пластической деформации на шероховатость фрезерованной поверхности коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т / А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, О.А. Подгорных, Н.Н. Шамарин, С.В. Фортуна, Е.О. Филиппова, А.В. Воронцов // СТИН. – 2019. – № 6. – С. 35–38.

20. *Morehead M., Huang Y., Hartwig K.T.* Machinability of ultrafine-grained copper using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47, iss. 2. – P. 286–293. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.03.014.

21. Constitutive modeling of ultra-fine-grained titanium flow stress for machining temperature prediction / J. Ning, V. Nguyen, Y. Huang, K.T. Hartwig, S.Y. Liang // Bio-Design and Manufacturing. – 2019. – Vol. 2, N 3. – P. 153–160. – DOI: 10.1007/s42242-019-00044-9.

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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 102–113
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

The Effect of the Structural State of AISI 321 Stainless Steel on Surface Quality During Turning

Nikolay Shamarin [1, a,*], ***Andrey Filippov*** [1, b], ***Sergei Tarasov*** [1, 2, c], ***Oleg Podgornykh*** [2, d], ***Veronika Utyaganova*** [1, e]

[1] Institute of Strenght Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation
[2] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-4649-6465, shnn@ispms.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-0487-8382, avf@ispms.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0003-0702-7639, tsy@ispms.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-7758-9242, podgornysh.o.a@mail.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-2303-8015, filaret_2012@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 14 December 2019
Revised: 30 December 2019
Accepted: 07 February 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Stainless steel
Severe plastic deformation
Cutting
Surface microgeometry

Funding
The reported study partly funded by RFBR according to the research project № 18-38-00058. Structural studies were carried out in the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of state academies of sciences for 2013-2020, direction III.23 (project No. AAAA-A19-119051590004-5).

ABSTRACT

Introduction. The development and continuous improvement of methods, technologies and equipment for the implementation of severe plastic deformation (SPD) helps to reduce the cost of producing ultrafine-grained (UFG) materials with improved physical and mechanical properties. Thereby, such materials become more accessible for use in full production of various objects. Cutting, and in particular turning, is the most common method of manufacturing products. However, at the moment there is a lack of information about the influence of the structural state of UFG materials on the qualitative characteristics of the surface after turning. **The purpose of the work:** to study the effect of structural conditions in AISI 321 stainless steel on the quality of its machining during turning. **In this work**, samples of AISI 321 stainless steel in the state as received and after structure formation are investigated using modern metal-cutting tools and equipment, as well as recommended cutting conditions. **The methods of investigation** are mechanical tests for compression and tension, transmission electron microscopy, optical metallography, laser scanning microscopy. **Results and discussion**. Based on the obtained experimental data, it can be concluded that SPD is an effective way to improve the quality of surface machining when turning AISI 321 stainless steel. For example, structure formation using SPD significantly reduces the roughness parameters of Sa and Sz. For better cutting quality and strength, rolling after ABC pressing is more efficient. The obtained results indicate a great potential for using of products from bulk UFG materials in industry due to the possibility of combining high mechanical properties and quality of dimensional machining. The data obtained can be applied in the design of technological processes for the machining of AISI 321 stainless steel with an ultrafine-grained structure under conditions of full production engineering.

For citation: Shamarin N.N., Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A. Utyaganova V.R. The Effect of the Structural State of AISI 321 Stainless Steel on Surface Quality During Turning. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 102–113. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113. (In Russian).

References

1. Shintani T., Murata Y. Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 4314–4322. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.03.055.

*** Corresponding author**
Shamarin Nikolay N., Junior Researcher
Institute of Strenght Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: 8 (905) 079-07-29, **e-mail:** shnn@ispms.ru

2. Rajasekhara S., Karjalainen L.P., Kyröläinen A., Ferreira P.J. Microstructure evolution in nano/submicron grained AISI 301LN stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, pp. 1986–1996. DOI: 10.1016/j.msea.2009.11.037.

3. Sun G.S., Du L.X., Hu J., Xie H., Wu H.Y., Misra R.D.K. Ultrahigh strength nano/ultrafine-grained 304 stainless steel through three-stage cold rolling and annealing treatment. *Materials Characterization*, 2015, vol. 110, pp. 228–235. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.001.

4. Hedayati A., Najafizadeh A., Kermanpur A., Forouzan F. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no. 8, pp. 1017–1022. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010.

5. Ning J. Inverse determination of Johnson – Cook model constants of ultra-fine-grained titanium based on chip formation model and iterative gradient search. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, pp. 1131–1140. DOI: 10.1007/s00170-018-2508-6.

6. *Chertovskikh V.* Cuttability of UFG titanium BT1-0 obtained by ECAE. *Russian Engineering Research*, 2007, vol. 27, pp. 260–264. DOI: 10.3103/S1068798X0705005X.

7. Huang Y., Morehead M. Study of machining-induced microstructure variations of nanostructured/ultrafine-grained copper using XRD. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2011, vol. 133, p. 021007. DOI: 10.1115/1.4003105.

8. Rodrigues A.R., Balancin O., Gallego J., Assis C.L.F. de, Matsumoto H., Oliveira F.B. de, Moreira S.R.D.S., Silva Neto O.V. da. Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels. *Materials Research*, 2012, vol. 15, pp. 125–130. DOI: 10.1590/S1516-14392011005000094.

9. Assis C.L.F. de, Jasinevicius R.G., Rodrigues A.R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015,vol. 77, pp. 1155–1165. DOI: 10.1007/s00170-014-6503-2.

10. Surya Kiran G.V.V., Krishna K.H., Sameer S., Bhargavi M., Kumar B.S., Rao G.M., Naidubabu Y., Dumpala R., Sunil B.R. Machining characteristics of fine grained AZ91 Mg alloy processed by friction stir processing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, vol. 27, pp. 804–811. DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60092-X.

11. Bayat Asl Y., Meratian M., Emamikhah A., Mokhtari Homami R., Abbasi A. Mechanical properties and machinability of 6061 aluminum alloy produced by equal-channel angular pressing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, vol. 229, pp. 1302–1313. DOI: 10.1177/0954405414535921.

12. Monkova K., Monka P., Cesanek J., Matejka J., Duchek V. Surface roughness evaluation after machining wear resistant hard coats. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 137, p. 03008. DOI: 10.1051/matecconf/201713703008.

13. Monka P., Monkova K., Modrak V., Hric S., Pastucha P. Study of a tap failure at the internal threads machining. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 100, pp. 25–36. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.035.

14. Monkova K., Monka P., Matejka J., Novak M., Cesanek J., Duchek V., Urban M. Surface machining after deposition of wear resistant hard coats by high velocity oxygen fuel technology. *Manufacturing Technology*, 2017, vol. 17 (6), pp. 919–925.

15. Monkova K., Monka P., Sekerakova A., Hruzik L., Burecek A., Urban M. Comparative study of chip formation in orthogonal and oblique slow-rate machining of EN 16MnCr5 steel. *Metals*, 2019, vol. 9 (6), p. 698. DOI: 10.3390/met9060698.

16. Filippov A.V., Filippova E.O. Ob”emnye ul’tramelkozernistye materialy ot strukturoobrazovaniya k formoobrazovaniyu [Volumetric ultrafine-grained materials from structure formation to shaping]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2018, no. 1, pp. 6–10. (In Russian).

17. Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Shamarin N.N., Podgornykh O.A., Filippova E.O. Otsenka 2D parametrov sherokhovatosti i volnistosti poverkhnosti posle obrabotki rezaniem splava AMg2 s ul’tramelkozernistoi strukturoi. Ch. 1. Tochenie [Evaluation of 2D parameters of roughness and surface waviness after machining of AMg2 alloy with ultrafine-grained structure. Pt. 1. Turning]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2018, no. 7, pp. 20–24. (In Russian).

18. Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A., Shamarin N.N., Filippova E.O., Vorontsov A.V. Otsenka 2D parametrov sherokhovatosti i volnistosti poverkhnosti posle obrabotki rezaniem splava AMg2 s ul’tramelkozernistoi strukturoi. Ch. 2. Frezerovanie [Evaluation of 2D parameters of surface roughness and waviness after machining of an AMg2 alloy with an ultrafine-grained structure. Pt. 2. Milling]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2018, no. 12, pp. 32–35. (In Russian).

19. Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A., Shamarin N.N., Fortuna S.V., Filippova E.O., Vorontsov A.V. Vliyanie ob"emnoi intensivnoi plasticheskoi deformatsii na sherokhovatost' frezerovannoi poverkhnosti korrozionno-stoikoi stali 12Kh18N10T [The effect of volumetric intense plastic deformation on the roughness of the milled surface of corrosion-resistant steel 12X18H10T]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2019, no. 6, pp. 35–38. (In Russian).

20. Morehead M., Huang Y., Hartwig K.T. Machinability of ultrafine-grained copper using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, iss. 2, pp. 286–293. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.03.014.

21. Ning J., Nguyen V., Huang Y., Hartwig K.T., Liang S.Y. Constitutive modeling of ultra-fine-grained titanium flow stress for machining temperature prediction. *Bio-Design and Manufacturing*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 153–160. DOI: 10.1007/s42242-019-00044-9.

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). 2020 Том 22 № 1 с. 114–135
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-114-135

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Закономерности структурообразования в материалах, полученных гибридным аддитивно-термомеханическим методом

Анастасия Гусарова [a], *Андрей Чумаевский* [b, *], *Ксения Осипович* [c], *Татьяна Калашникова* [d], *Кирилл Калашников* [e]

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-4208-7584, gusarova@ispms.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-1983-4385, tch7av@gmail.com,
[c] https://orcid.org/0000-0001-9534-775X, osipovich_k@ispms.tsc.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-0388-4011, gelombang@ispms.tsc.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-0286-7156, sso.spektr.asu@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152.341

История статьи:
Поступила: 15 декабря 2019
Рецензирование: 10 января 2020
Принята к печати: 14 февраля 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Фрикционная перемешивающая обработка
Электронно-лучевая аддитивная технология
Структурно-фазовое состояние
Механические свойства
Полиметаллические материалы
Гибридные технологии

Финансирование
Работа по получению и исследованиям структуры образцов методом аддитивного производства и фрикционной перемешивающей обработки выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23. Работы по получению и исследованию материалов системы Cu–Al методом аддитивного электронно-лучевого производства выполнены в рамках проекта Российского Научного Фонда № 19-79-00136.

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время активно развиваются методы аддитивных технологий для получения металлических материалов различного химического и фазового состава. Проволочная технология, основанная на методе электронно-лучевого плавления, является одной из наиболее перспективных технологий, позволяющих помимо получения деталей сложной формы создавать материалы с градиентной, слоистой или уникальной структурой. Но такие технологии позволяют получать изделия со структурой литого разупрочненного материала с крупнокристаллическим строением и неравномерным распределением компонентов используемого материала. Для получения однородной структуры получаемых материалов, а также упрочнения материала и измельчения зерен структуры возможно применение дополнительной фрикционной перемешивающей обработки, способной изменить распределение компонентов полиметаллического образца с формированием структуры, недостижимой при получении материалов существующими методами. Исходя из вышесказанного актуальной на настоящее время является проблема измельчения зерна, упрочнения материала и получения однородной структуры при изготовлении полиметаллических материалов из однородных и разнородных металлов и сплавов. В статье для решения этой проблемы используется совмещение методик аддитивного электронно-лучевого производства и фрикционной перемешивающей обработки. Подход заключается в том, что методом интенсивной пластической деформации воздействуют на градиентный переход полиметаллического изделия, изготовленного методом аддитивного производства. **Целью настоящей работы** является исследование макроструктурных закономерностей формирования полиметаллических образцов методом аддитивного электронно-лучевого производства, образующих в зоне контакта механические смеси (Cu–Fe), твердые растворы и интерметаллидные соединения (Cu–Al). **В работе исследованы** особенности формирования биметаллических образцов из однородных и разнородных металлов, полученных аддитивным методом, и закономерности структурных изменений в материалах системы Cu-Fe после гибридной аддитивно-термомеханической обработки. **Методами исследования** являются оптическая, растровая электронная микроскопия и анализ микромеханических свойств при измерении микротвердости в различных сечениях полученных образцов. **Результаты исследования.** Выявлены особенности структурных изменений в материалах, полученных аддитивным методом, в зависимости от типов формирующихся фаз в зоне контакта материалов полиметалла. Полученные данные свидетельствуют о более равномерном распределении в зоне структурного градиента компонентов полиметаллического образца, не образующих в зоне контакта интерметаллидных фаз и твердых растворов. Были установлены закономерности пластической деформации и фрагментации в системе Cu-Fe (медь М1 – сталь 12Х18Н9Т) после фрикционной перемешивающей обработки с использованием растровой электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа и оптической микроскопии. Полученные данные свидетельствуют о формировании в зоне перемешивания потоков металла в направлении течения материала по контуру инструмента. Слои имеют различный размер зерна, особенности распределения частиц меди и стали, а также закономерности распределения химических элементов. По краям зоны перемешивания имеет место избыточное замешивание стали в верхние слои материала с нижележащих слоев. В зоне перемешивания проявляется неоднородность строения в распределении отдельных слоев, их толщине, размере зерна и объемной доле различных фаз.

Для цитирования: Закономерности структурообразования в материалах, полученных гибридным аддитивно-термомеханическим методом / А.В. Гусарова, А.В. Чумаевский, К.С. Осипович, Т.А. Калашникова, К.Н. Калашников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. –Т. 22, № 1. – С. 114–135. – DOI:10.17212/1994-6309-2020-22.1-114-135.

***Адрес для переписки**
Чумаевский Андрей Валерьевич, н.с.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
пр. Академический, 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (961) 891-41-49, **e-mail:** tch7av@gmail.com

Введение

В настоящее время в производстве деталей из металлических материалов аддитивным методом преобладают методики, основанные на плавлении металлического или порошкового материала с послойным формированием изделия. При таком подходе структура изделия представлена литым дендритным строением [1–4], что снижает характеристики механических свойств, ограничивает практическую применимость изделий и в ряде случаев обусловливает необходимость проведения дополнительных термообработок после изготовления деталей. При печати деталей из разнородных металлов (например, Cu–Al) происходит резкое падение прочности в зоне контакта материалов за счет формирования протяженных непрерывных интерметаллидных прослоек, аналогичных наблюдаемым при сварке плавлением. При печати деталей из материалов, не образующих в контакте интерметаллидных фаз или твердых растворов (например Cu–Fe), основными дефектами в структуре являются неоднородности распределения компонентов системы в градиентной зоне.

Формирование разупрочненных крупнокристаллических литых структур, получаемых при аддитивном электронно-лучевом методе 3D-печати, приводит к высоким усталостным характеристикам, пластичности и низкой твердости образцов, что определяет высокую стойкость материалов в условиях малоцикловой усталости, а также является причиной низких свойств в тех условиях, когда необходимы повышенные механические свойства и сопротивление изнашиванию.

Для повышения прочности материалов в процессе аддитивного изготовления возможно применение в составе материалов различных порошковых частиц, выступающих в роли центров кристаллизации при затвердевании и препятствующих росту зерна при последующем охлаждении. Возможно также использование в процессе формирования изделия механической или термомеханической обработки, способствующей измельчению зерна, повышению прочности или выравниванию распределения компонентов полиметаллических материалов. В настоящее время таких методик в литературе описано достаточно много, однако их применение в аддитивных технологиях еще не нашло широкой востребованности.

Одной из методик модификации поверхностного слоя с образованием ультрамелкодисперсной структуры с равномерным распределением зерна является технология фрикционной перемешивающей обработки, аналогичная сварке трением с перемешиванием, которая основана на эффекте адгезионного трения между материалами без смазочного слоя [5–17]. В условиях фрикционной перемешивающей обработки и сварки трением с перемешиванием возможно формирование как упрочненного поверхностного слоя с ультрамелкодисперсной зеренной структурой [18–20] и повышенными прочностными свойствами [5, 6, 12, 17] или пластичностью [21–23], так и сложных, в том числе полиметаллических, систем с наличием в структуре упрочняющих фаз различного типа [24–29]. Получение упрочняющих фаз в материалах методом фрикционной перемешивающей обработки возможно путем засыпки в специальные углубления в поверхностном слое порошкового материала, внедрения цилиндрических элементов в материал или посредством обработки пакетов листов [30–32].

Несмотря на большое количество исследований в области применения аддитивных технологий, развитие 3D-печати для получения деталей сложной формы и использование различных материалов, изделия из которых затруднительно или невозможно изготавливать стандартными технологиями [33–38], основной проблемой существующих работ является отсутствие подробных исследований особенностей структурных изменений в материалах при комбинированных воздействиях в процессе получения. Возможность применения помимо порошкового [39] материала проволочных филаментов [1–4] позволяет использовать для печати стандартные проволочные материалы, имеющиеся на рынке. С помощью одновременной или поочередной подачи проволочного материала возможно формирование протяженных градиентных областей. При этом работ по получению материалов совмещением методов фрикционной перемешивающей обработки и аддитивных процессов порошкового/проволочного типа на момент написания настоящей статьи обнаружено немного [40], что, кстати, касается и работ по сварке

трением или сварке трением с перемешиванием аддитивно полученных образцов [41, 42]. Однако в ранее проведенных работах по исследованию закономерностей преобразования структуры в материалах, изготовленных методом фрикционной перемешивающей обработки, сварке трением с перемешиванием и аддитивным электронно-лучевым методом, было сделано предположение о целесообразности применения комбинации вышеуказанных методов для получения образцов со сложной структурой [43].

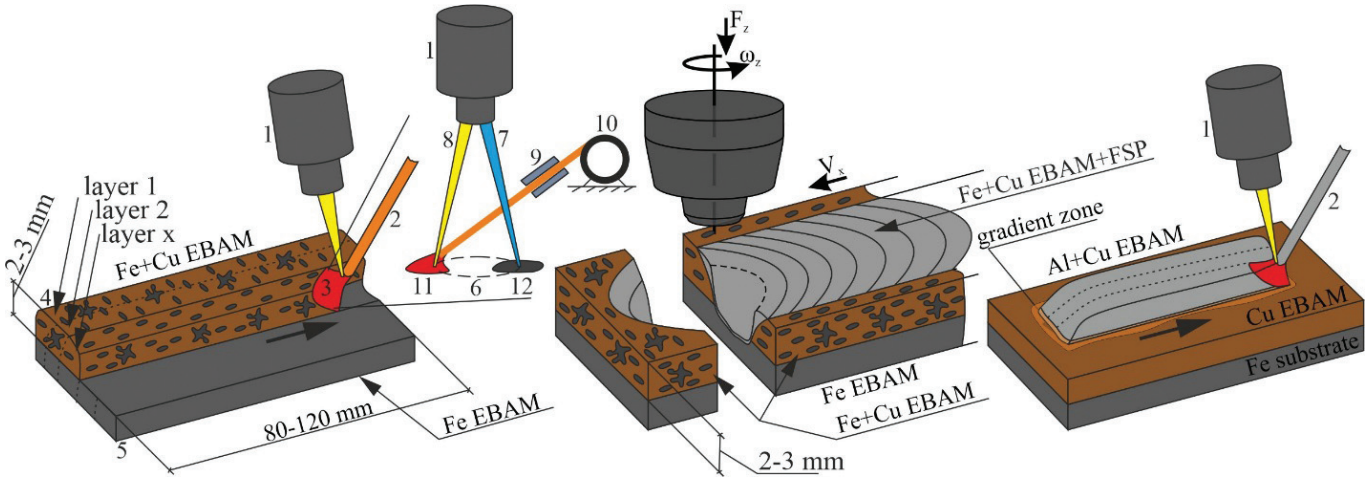
Одним из преимуществ осуществления метода комбинированного (или гибридного) получения материалов с помощью аддитивной технологии и адгезионно-диффузионного термомеханического процесса является возможность формирования полиметаллических систем с однородной макро- и микроструктурой. При использовании, например, многопроволочной подачи формируется образец с изначально заданными объемными долями компонентов. При последующей фрикционной перемешивающей обработке происходит перераспределение, фрагментация и упорядочение расположения компонентов системы. С использованием только одной из вышеуказанных технологий получить однородную структуру не представляется возможным, так как при фрикционной перемешивающей обработке сложно осуществить контролируемое внедрение в один материал определенной макроскопической объемной доли второго материала, а при аддитивном производстве методом проволочной или порошковой технологии – сформировать мелкодисперсный материал.

В связи с изложенным выше настоящая работа направлена на установление закономерностей формирования структуры материалов при аддитивном электронно-лучевом получении, а также в условиях гибридного аддитивного и термомеханического воздействия при изготовлении деталей из однородных и разнородных материалов.

Методика исследований

Получение образцов из меди марки М1 и стали 12Х18Н9Т, а также из меди М1 и алюминиевого сплава АМг5 производилось на экспериментальной установке в ИФПМ СО РАН при помощи двух податчиков проволочного филамента поочередно в последовательности «12Х18Н9Т-М1» (рис. 1, *а*) и «М1-АМг5» (рис. 1, *в*). Сокращенно данные системы полиметаллических материалов в работе обозначаются по основному компоненту алюминиевого сплава и стали как системы «Cu–Al», «Cu–Fe». Значения параметров процесса печати (сила тока пучка и скорость подачи проволоки) определяли эмпирическим путем. Ускоряющее напряжение составляло 30 кВ, развертка пучка – эллипс. Толщина проволочных филаментов составляла 1,2 мм; средняя толщина слоя составляла порядка 0,8…1,0 мм. Экспериментальные образцы были вырезаны в форме плоских параллелепипедов толщиной 4…6 мм (2…3 мм толщина медной, стальной или алюминиевой области). В качестве подложки использовали листовой прокат аустенитной стали 12Х18Н9Т толщиной 10 мм для полиметалла «Cu-Al» и «Cu-Fe». Слои каждого из материалов наносились последовательно со смещением на ширину одного слоя до формирования плоского образца размером не менее 80…120 мм длиной и 60…80 мм шириной. Такой процесс производился последовательно до 3…4 раз с формированием пакета слоев для достижения требуемой толщины.

Получение полиметалла «медь М1 – сталь 12Х18Н9Т» производилось в следующей последовательности. Вначале на поверхности подложки из нержавеющей аустенитной стали формировался пакет слоев из стали. Далее посредством плавления электронным лучом от источника *1* проволоки *2* с формированием ванны расплава *3* формировался пакет слоев *4* из меди марки М1 с замешанными в медь частицами стали из нижележащих слоев *5*. Для печати использовалась развертка электронного пучка в виде движения по траектории эллипса *6* диаметром 5…6 мм. Посредством развертки регулировалось тепловложение в материал подложки и в материал проволоки. В положении пучка *7* производилось оплавление подложки с формированием оплавленной зоны *12*, а в положении *8* луч расплавлял проволоку из меди с образованием ванны расплава *11*, в котором при печати происходило перемешивание с оплавленной зоной подложки и формирование градиентной зоны из двух компонентов полиметалла. Подача проволоки осуществлялась с помощью податчика *9* с барабана *10*.



а *б* *в*

Рис. 1. Схемы процессов получения образцов системы «М1–12Х18Н9Т» и «М1–АМг5»:

а – методом аддитивного электронно-лучевого производства системы «М1–12Х18Н9Т»; *б* – методом аддитивного электронно-лучевого производства системы «М1–12Х18Н9Т» с последующей фрикционной перемешивающей обработкой; *в* – методом аддитивного электронно-лучевого производства системы «М1–АМг5»; *1* – электронно-лучевая пушка; *2* – проволочный филамент; *3* – ванна расплава; *4* – градиентный материал системы «М1 – 12Х18Н9Т», полученный электронно-лучевой технологией; *5* – слои из стали 321, полученные электронно-лучевой технологией; *6* – развертка электронного пучка; *7* – положение пучка в области прогрева подложки; *8* – положение пучка в области плавления проволоки; *9* – податчик проволоки; *10* – барабан с проволокой; *11* – ванна расплава проволоки; *12* – оплавленный металл подложки; F_z – осевое усилие при обработке, ω_z – скорость вращения инструмента; V_x – скорость подачи заготовки при обработке

Fig. 1. Schemes of processes for obtaining samples of the “copper–steel” and “copper–aluminum alloy” systems:

а – by the method of electron-beam additive manufacturing of the “copper–steel” system; *б* – by the method of electron-beam additive production of the “copper–steel” system with subsequent friction stir processing; *в* – by the method of electron-beam additive manufacturing of the “copper–aluminum alloy” system; *1* – electron-beam gun; *2* – wire filament; *3* – molten bath; *4* – gradient material of copper-steel system obtained by electron-beam technology; *5* – layers of steel 321 obtained by electron-beam technology; *6* – electron beam scanning type; *7* – beam position in the substrate heating area; *8* – beam position in the wire melting area; *9* – wire feeder; *10* – wire drum coil; *11* – wire molten bath; *12* – molten metal of the substrate; F_z – axial force during processing; ω_z – tool rotation speed; V_x – workpiece feed speed during processing

Получение полиметалла «М1-АМг5» осуществлялось аналогично получению полиметалла «М1-12Х18Н9Т». В случае полиметалла «М1-АМг5», формировалась протяженная градиентная зона взаимной диффузии с образованием твердых растворов и интерметаллидных фаз (рис. 1, *в*).

Фрикционная перемешивающая обработка образцов из стали 12Х18Н9Т и меди М1 (рис. 1, *б*) проводилась на лабораторном оборудовании в ИФПМ СО РАН. В процессе обработки вращающийся инструмент внедрялся в поверхность полиметаллического материала и разогревал поверхностный слой. Далее при движении вдоль линии обработки происходило перемешивание компонентов системы за счет адгезионного взаимодействия материала с инструментом и увеличения давления в зоне перед пином инструмента. Инструмент изготовлен из сплава ЖС6У гладкой формы без нарезки в области пина и плеч. Глубина обработки составляла 2,3 мм; скорость продольной подачи – 90 мм/мин; скорость вращения инструмента – 400 об/мин; сила прижатия инструмента – 900 кг. По причине низкой на данный момент стабильности печати в паре материалов «М1-АМг5» проведение дальнейшей обработки трением с перемешиванием не проводилось (причина низкой стабильности рассмотрена далее).

Макроструктура образцов полиметаллических изделий исследовалась на вырезанных электроискровым методом в поперечном сечении образцах с использованием растровой и оптической микроскопии. РЭМ-исследования проводились при помощи растрового электронного микроскопа Zeiss LEO EVO 50 в режиме обрат-

норассеянных электронов. Химический состав различных структурных составляющих определяли с помощью микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе. Оптическую микроскопию проводили на конфокальном микроскопе Olympus LEXT 4100, микротвердость измеряли на микротвердомере Duramin 5.

Результаты и их обсуждение

В процессе электронно-лучевого аддитивного производства полиметаллических образцов системы «медь-сталь» происходило формирование сложной градиентной зоны практически на всю высоту 2,3 мм нанесенных слоев меди. На подложку из нержавеющей стали изначально наносились слои из стали аустенитного класса 12Х18Н9Т. Затем на слои стали 12Х18Н9Т наносились слои меди также из проволочного филамента. По причине существенного оплавления поверхностного слоя стали при нанесении медного филамента происходило достаточно интенсивное перемешивание материала. Оплавленные частицы стали по причине меньшей плотности проявляли тенденции к подъему в верхние слои меди. Так как проплавление поверхностного слоя электронным пучком производилось и при наплавлении последующих слоев, то частицы стали, внедренные в первые слои, поднимались выше и попадали в наиболее высокие слои материала. В результате в поверхностных слоях образца происходило формирование сложной градиентной структуры при переходе от стали к меди (рис. 2, *а*). При этом в структуре нижнего слоя присутствуют как крупные области замешанной в медную матрицу стали *1*, так и области со средним *2*, *3*, малым *4* и высоким *5* содержанием частиц стали различного размера. Формирование частиц стали в медной матрице обусловлено закономерностями процесса перемешивания материала в жидком состоянии и последующей кристаллизацией дендритов: сначала – аустенита, затем – меди. В области с небольшими по размеру частицами частиц дендритного типа наблюдается небольшое количество. Частицы могут быть разного размера (рис. 2, *б–д*). Могут быть крупные частицы размером от 50…70 мкм *6*, *11*, *14* до 200 мкм и более *10*. Внутри наиболее крупных частиц γ-железа *10*, *11* в медной матрице также присутствуют частицы меди, в которых, в свою очередь, могут присутствовать частицы железа (рис. 2, *в*, *г*), что свидетельствует о сложном и неоднородном характере перемешивания компонентов системы в жидком состоянии при нанесении слоев на поверхность. Частицы среднего размера *7*, *12*, *15* формируются в интервале 10…20 мкм. Мелкие частицы *8*, *13*, *16* имеют размер до 5 мкм.

При выбранном в настоящей работе способе аддитивного электронно-лучевого получения полиметаллических материалов системы «М1-АМг5» стабилизации процесса формирования материала и структуры добиться не представляется возможным по ряду причин. Основной причиной является интенсивная взаимная диффузия компонентов системы с формированием в зоне структурного градиента неоднородной и высокодефектной структуры (рис. 3). В данном случае одними из основных типов структурных составляющих являются различные твердые растворы и интерметаллидные соединения (по данным ранее проведенной работы [43]), а также их механические смеси (рис. 3, *а–в*). В твердых растворах *2* интерметаллидные фазы *3* могут присутствовать как отдельные частицы, расположенные хаотично, а также как и тонкие системы мелких частиц или прослоек в междендритных пространствах. В структуре полученного образца в основном наблюдается чередование различных по составу слоев от меди *1* до твердых растворов Al–Cu *2*, смеси твердых растворов и интерметаллидов *4*, частиц интерметаллидных фаз или непрерывных интерметаллидных прослоек *3*. Внутри интерметаллидных прослоек или на границе их с соседними областями возможно формирование дефектов в виде трещин *5*, появление которых обусловлено различной величиной коэффициента термического расширения и пластичностью интерметаллидов и твердых растворов.

В зоне перемешивания в жидком состоянии возможно формирование крупных неоднородностей распределения меди и алюминия (*6*, *7* на рис. 3, *д*), что также влияет на неравномерность структуры по образцу в целом и свидетельствует о низкой стабильности процесса. Такие образования могут иметь сложную конфигурацию и располагаться в различных зонах образца, а также содержать

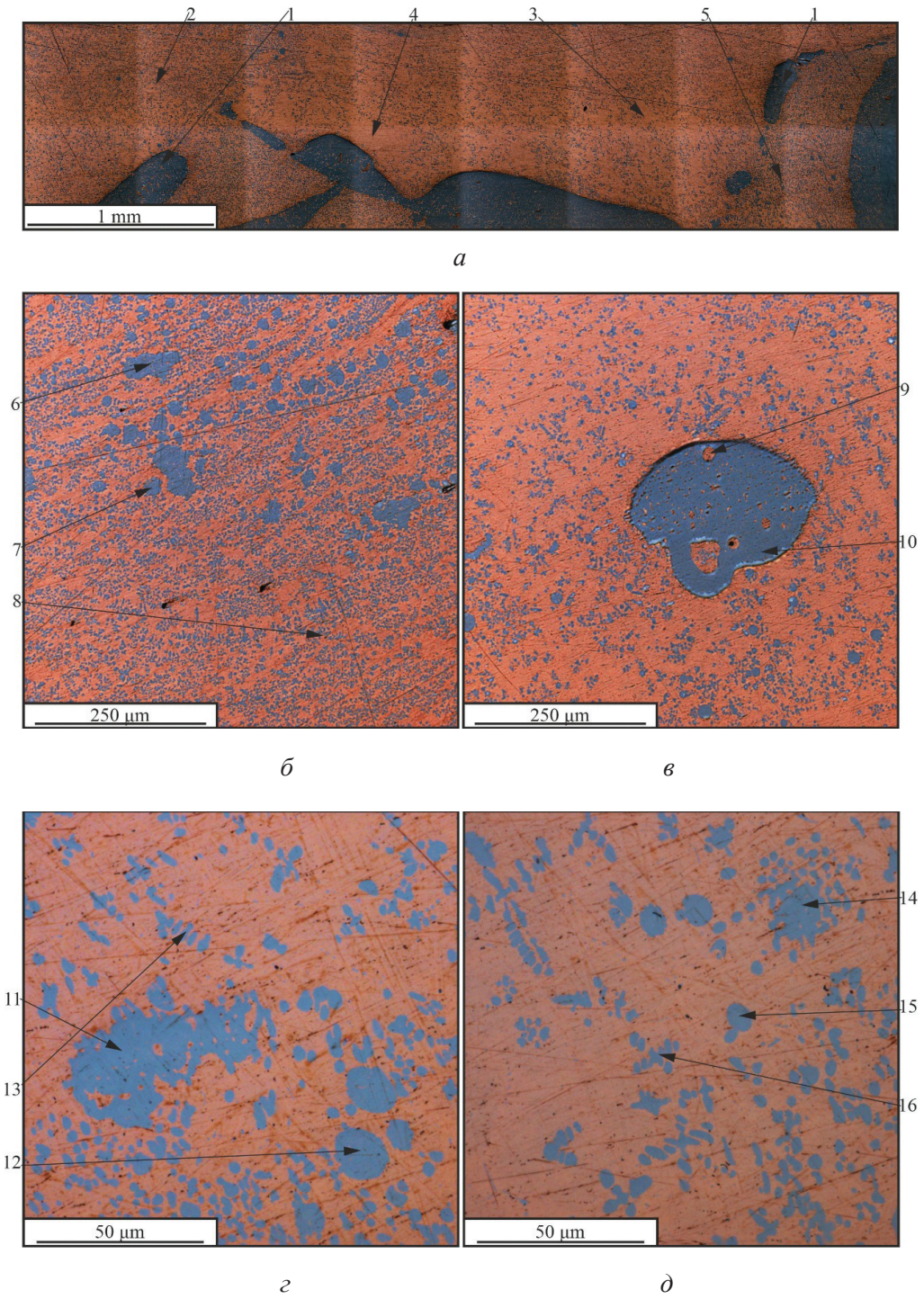


Рис. 2. Структура образцов системы «М1 – 12Х18Н9Т» после аддитивного электронно-лучевого получения:

1 – большие объемы замешанной стали; *2*, *3* – области со средним содержанием частиц стали; *4* – область с низким количеством частиц; *5* – область с высоким содержанием частиц стали; *6*, *10*, *11*, *14* – крупные частицы стали в медной матрице; *7*, *12*, *15* – частицы среднего размера; *7*, *13*, *16* – мелкие частицы стали; *10* – частицы меди внутри частиц стали

Fig. 2. Structure of copper-steel system samples after electron-beam additive manufacturing:

1 – large volumes of mixed steel; *2*, *3* – areas with medium steel particle content; *4* – area with low particle content; *5* – area with high steel particle content; *6*, *10*, *11*, *14* – large steel particles in copper matrix; *7*, *12*, *15* – medium sized particles; *7*, *13*, *16* – small steel particles; *10* – copper particles inside steel particles

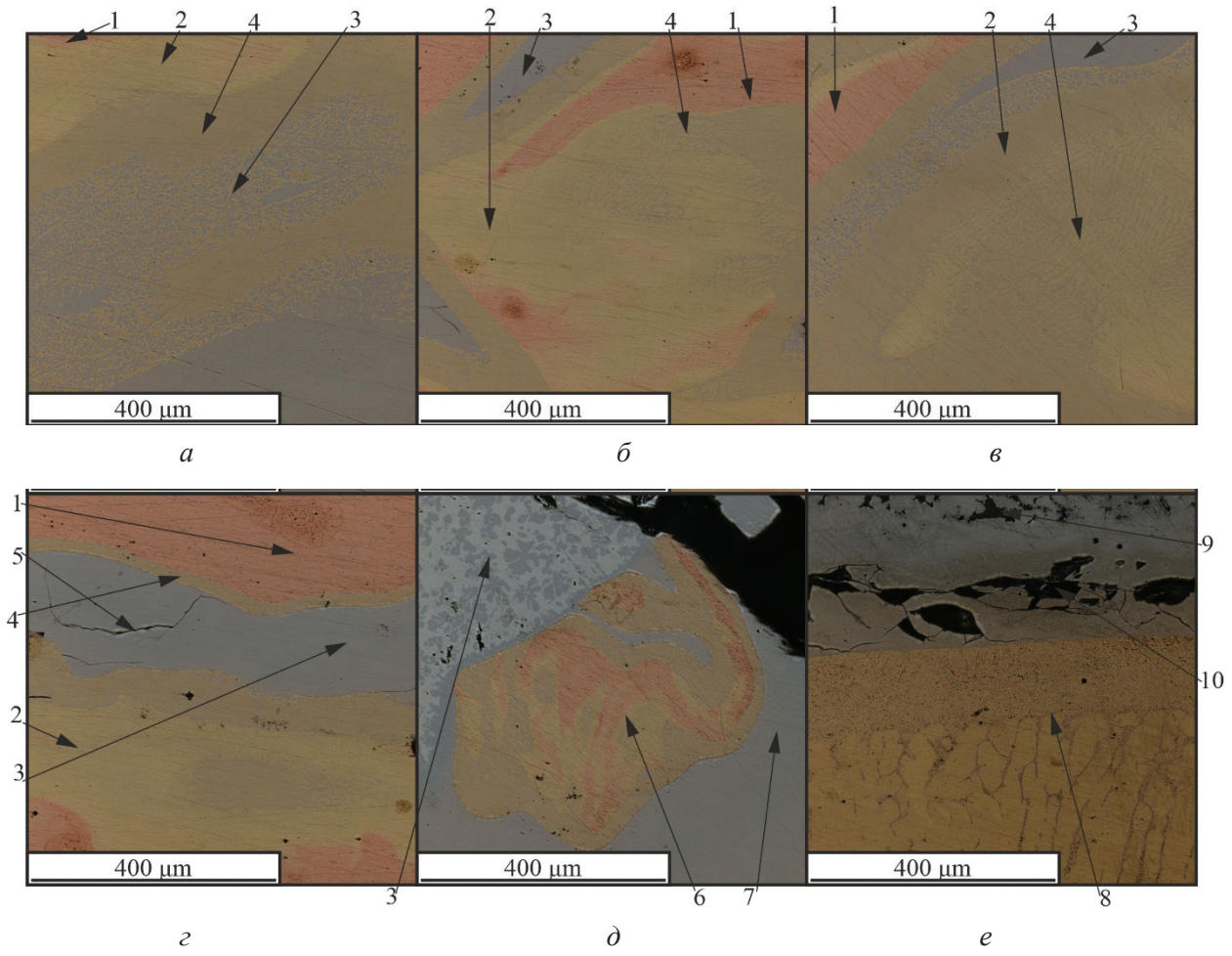


Рис. 3. Структура образцов системы «М1–АМг5»:

1 – медь; *2* – твердые растворы меди и алюминия; *3* – интерметаллидные частицы; *4* – смесь твердых растворов и интерметаллидных фаз; *5* – трещины в интерметаллидных фазах; *6* – большие области неоднородностей строения; *7* – алюминиевый сплав; *8* – граничная зона между медью и алюминием; *9* – дефекты в интерметаллидных слоях; *10* – трещины по границе интерметаллидных фаз и зоны твердых растворов

Fig. 3. Structure of copper-aluminum system samples:

1 – copper; *2* – solid solutions of copper and aluminum; *3* – intermetallic particles; *4* – mixture of solid solutions and intermetallic phases; *5* – cracks in intermetallic phases; *6* – large areas of structural heterogeneity; *7* – aluminum alloy; *8* – boundary zone between copper and aluminum; *9* – defects in intermetallic layers; *10* – cracks on the boundary between intermetallic phases and solid solution zones

дефекты различного структурно-масштабного уровня. Наиболее существенными дефектами в материале являются структурные неоднородности *8*, скопления пор *9* и растрескивание по границе твердых растворов и крупных интерметаллидных прослоек *10*, формируемых в зоне контакта меди и алюминиевого сплава при резком градиенте структуры от одного материала к другому. Появление таких дефектов предположительно обусловлено различными характеристиками теплового расширения и пластичности интерметаллидных фаз и твердых растворов. В основном для образования расслоений или растрескиваний по границам различных фаз необходимо формирование сплошных интерметаллидных прослоек большой протяженности. В проведенных исследованиях с выбранным методом нанесения алюминиевого филамента на поверхность медного филамента невозможно контролировать степень взаимной диффузии и плавность градиента полученных структур, что делает появление вышеуказанных дефектов в структуре граничной области полиметалла неизбежным, а также невозможным формирование образцов гибридным методом. По этой причине

в настоящем исследовании фрикционная перемешивающая обработка данных материалов не проводилась.

В целом полученные в настоящей работе и предыдущих исследованиях [44] данные свидетельствуют о достаточно неравномерном на микроуровне распределении частиц стали в объеме медной матрицы, причем такой характер распределения частиц сохранялся, но в более узкой области, и при печати с одновременным внедрением в зону печати двух проволочных филаментов из меди и стали. По этой причине в настоящей работе для формирования мелкодисперсной смеси γ-железа и меди были проведены работы по фрикционной перемешивающей обработке. При этом описанные ранее особенности печати полиметаллов системы «М1-АМг5» не позволяют добиться стабильности структуры и требуют изменения методики печати в целом.

В образцах системы «М1-12Х18Н9Т» после фрикционной перемешивающей обработки происходило формирование сложноорганизованной системы из различных по конфигурации слоев материала, расположенных в наплавлении течения по контуру инструмента в процессе обработки (рис. 4). Как показывают исследования процессов, происходящих в материале в зоне выхода инструмента (рис. 4, *а*), при обработке с нижних стальных слоев формируются крупные потоки материала *1* снизу вверх по контуру инструмента. В результате в объем медной матрицы происходит избыточное замешивание

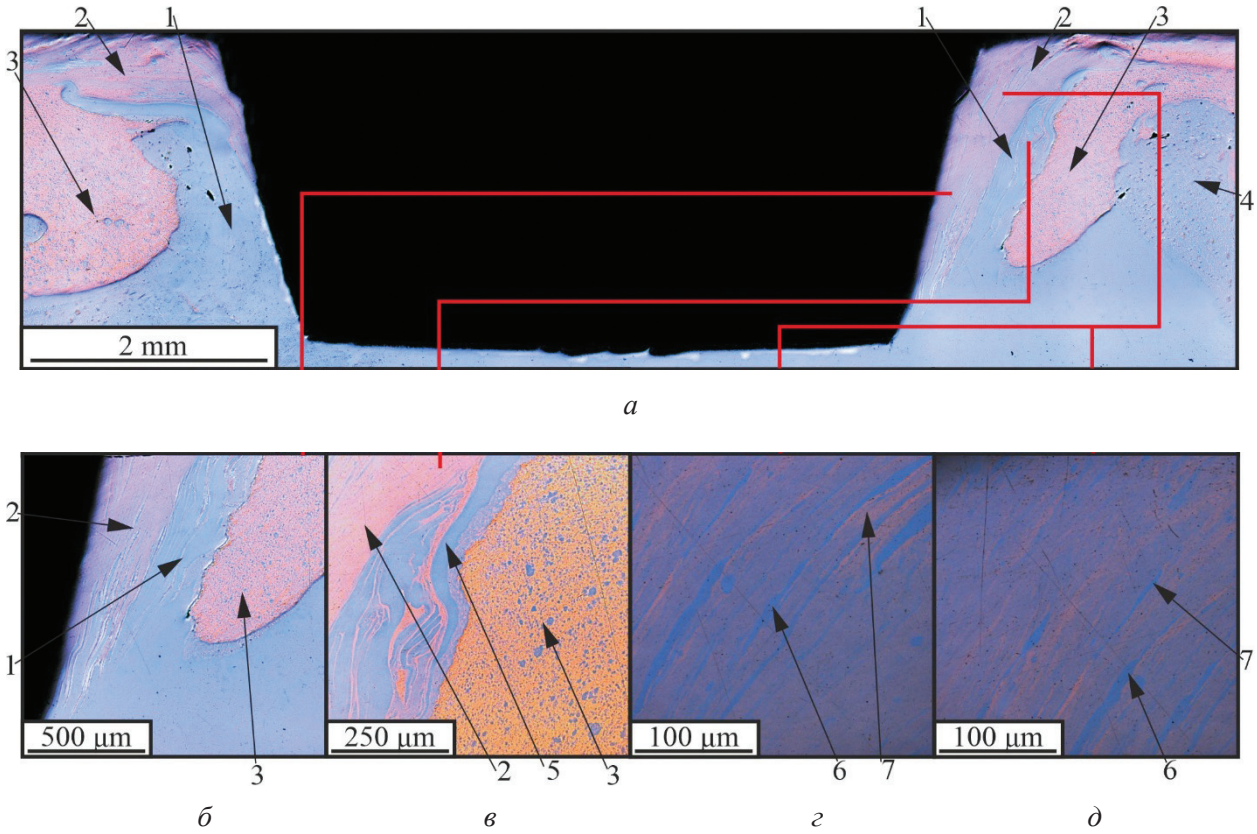


Рис. 4. Изменение структуры в зоне выхода инструмента после обработки образцов системы «М1–12Х18Н9Т»:

а – панорамное изображение зоны выхода инстумента; *б* – формирование потока стали от нижележащих слоев; *в* – изменение структуры после обработки; *г*, *д* – формирование слоистой структуры из стали и смеси стали и меди; *1* – крупные потоки стали; *2* – перемешанный материал градиентного слоя; *3* – материал градиентного слоя, не подверженный обработке; *4* – материал градиентного слоя с избыточным замешиванием стали; *5*, *6* – потоки стали с измельченной структурой; *7* – потоки смеси меди и стали

Fig. 4. Structural changes in the tool outlet area after processing of copper-steel system samples:

а – panoramic image of the tool outlet area; *б* – steel flow formation from the underlying layers; *в* – structural change after processing; *г*, *д* – steel and copper mixture layer formation; *1* – large steel flows; *2* – gradient layer mixed material; *3* – unprocessed gradient layer material; *4* – gradient layer material with excessive steel mixing; *5*, *6* – steel flows with milled structure; *7* – copper and steel mixture flows

стального материала и образуются слоистые области *2*, обогащенные сталью (рис. 4, *б–д*). При этом области необработанного материала *3* резко контрастируют с областями, прошедшими обработку (рис. 4, *б*, *в*). В областях со слоистым строением происходит чередование слоев стали и слоев ультрамелкодисперсных смесей из зерен меди и γ-железа (*5–7*, рис. 4, *б-д*).

В зоне перемешивания при этом отсутствуют внедрения крупных объемов стали, которые наблюдались по ее краям (*1*, рис. 4). В структуре зоны перемешивания наблюдается чередование слоев с различным размером частиц стали в медной матрице (рис. 5). С наступающей стороны можно выделить по контуру зоны перемешивания материалов также крупные объемы стали, располагающиеся от нижних стальных слоев до верхних слоев с наступающей стороны под плечами инструмента (рис. 5, *а*). В центре зоны перемешивания чередование слоев с различной структурой и размером осуществляется в последовательности слоев с крупными частицами и слоев с мелкими частицами (рис. 5, *б*, *в*). Наличие более крупных частиц стали *1* характерно для всех типов слоев: и с мелкодисперсным строением *2*, *5*, *6*, и с грубодисперсной структурой *4*. В слоях с крупным размером зерна (рис. 5, *е*) размер частиц стали в медной матрице может достигать в среднем 3 мкм и более, в то время как в слоях с мелкодисперсной структурой (рис. 5, *г*, *д*) средний размер частиц стали в меди может достигать 0,5…1 мкм и меньше.

Различие в размере частиц стали в медной матрице внутри слоев связано, прежде всего, с физической природой процесса фрикционной перемешивающей обработки. Часть перемешиваемого материала имеет контакт непосредственно с инструментом для фрикционной обработки и испытывает большую пластическую деформацию, чем материал, увлекаемый за счет когезионных сил и разницы давлений (спереди и сзади пина) за инструментом. Вследствие этого формируется структура с более мелкодисперсными частицами в одних слоях и с более крупными – в других. При более детальном рассмотрении частиц по размеру можно выделить слои с бимодальным или тримодальным распределением.

Крупные частицы стали (*3*, рис. 6, *а*) и средние частицы *2* в структуре медной матрицы *1* необработанного материала при фрикционной перемешивающей обработке деформируются, фрагментируются и разрушаются (рис. 6, *б–г*). В материале после обработки в большом количестве имеются частицы *4*, *7*, *8*, которые разрушились под действием интенсивной пластической деформации. Причем более интенсивное разрушение частиц наблюдается в слоях с мелкодисперсной структурой *6*, чем в слоях с грубодисперсной *5*. Частицы в стадии разрушения (рис. 6, *в*) хорошо иллюстрируют процесс деформации и фрагментации при обработке, приводящей на заключительном этапе к формированию мелкодисперсной структуры *8* с более равномерным распределением стали и меди. Из проведенных исследований можно предположить, что выполнение многопроходных обработок позволит еще больше повысить степень деформации и разрушения крупных частиц стали и увеличить равномерность распределения компонентов полиметалла.

Химический анализ методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе полиметаллических образцов системы «сталь-медь» до обработки (рис. 7, *а–д*) и после обработки (рис. 7, *е–к*) показывает, что в материалах, полученных аддитивным методом, распределение меди и железа четко контрастируют между собой (рис. 7, *б*, *д*). Железо и хром демонстрируют равномерное распределение (рис. 7, *г*, *д*). Распределение никеля (рис. 7, *в*) за исключением крупных частиц достаточно равномерно по причине хорошей взаимной растворимости меди и никеля.

Распределение никеля в материале после обработки аналогично: в крупных частицах содержание никеля существенно выше, в областях с мелкодисперсным строением распределение никеля более равномерно (рис. 7, *з*). Распределение железа и хрома также идентично (рис. 7, *и*, *к*). Изменяется закономерность в распределении меди и железа (рис. 7, *ж*, *к*). В слоях с грубодисперсной структурой медь и железо также четко контрастируют, но в слоях с мелкодисперсной структурой распределение меди и железа становится настолько однородным, что данные элементы становятся слабо различимыми.

При анализе структуры и химического состава необработанного (рис. 8, *а*, *г*) и обработан-

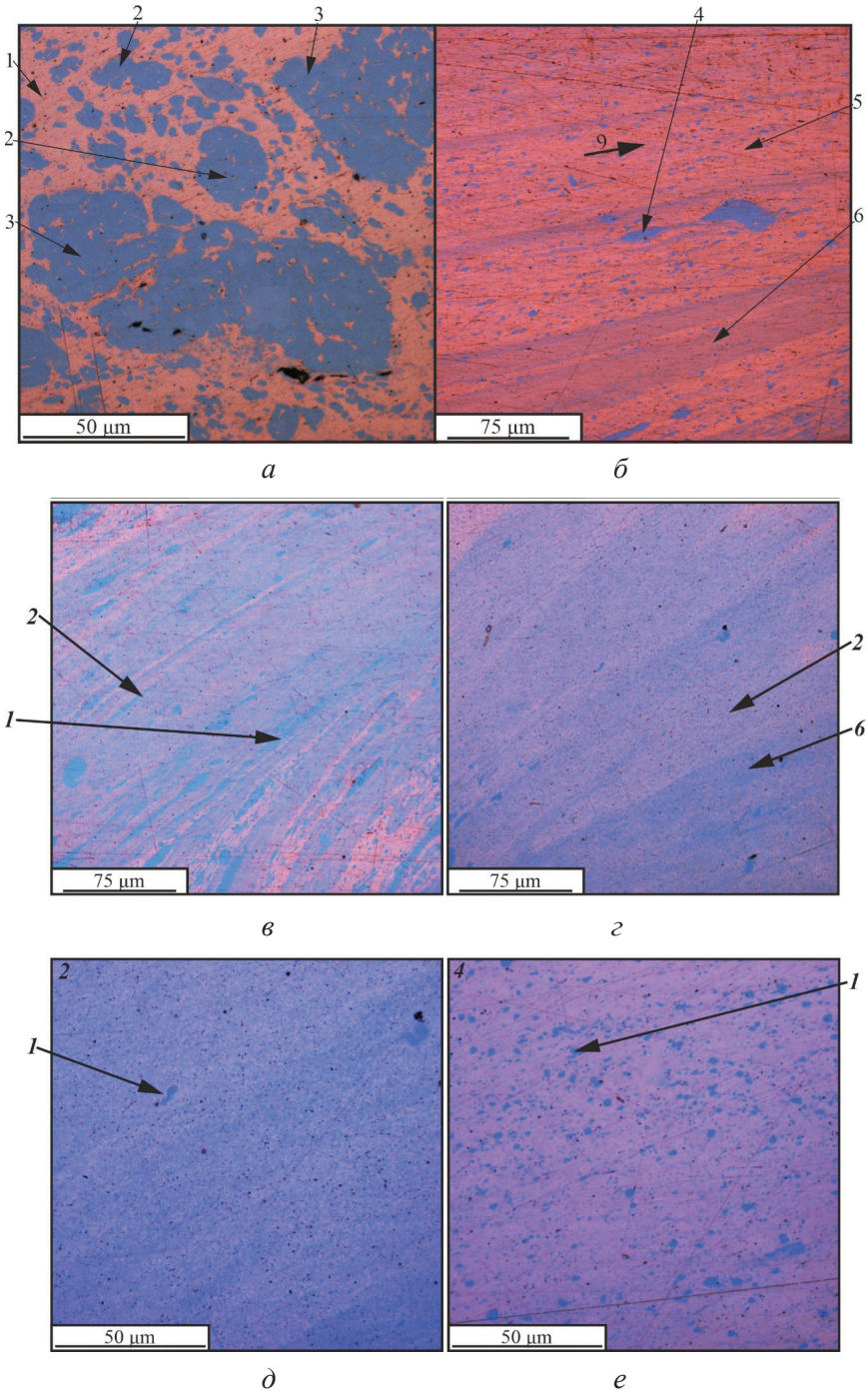


Рис. 5. Структура зоны перемешивания образцов системы «М1–12Х18Н9Т» после нанесения и обработки:

а, *б* – край зоны перемешивания с наступающей стороны; *в*, *г* – формирование грубодисперсных и мелкодисперсных структур; *д*, *е* – слои с мелкодисперсным и крупнокристаллическим строением; *1* –крупные частицы; *2* – слои мелкодисперсного строения; *3* – крупные объемы стали, затянутые с нижележащих слоев; *4* – слои грубодисперсного состава; *5*, *6* – формирование слоев с различным содержанием стали

Fig. 5. Structure of the stir zone of copper-steel system samples after deposition and processing:

а, *б* – edge of a stir zone at the advancing side; *в*, *г* – formation of coarse disperse and fine-disperse structures; *д*, *е* – layers with fine-disperse and large-crystalline structure; *1* – rather large particles; *2* – layers of fine-disperse structure; *3* – large volumes of steel tightened from underlying layers; *4* – layers of coarse disperse composition; *5*, *6* – formation of layers with different steel content

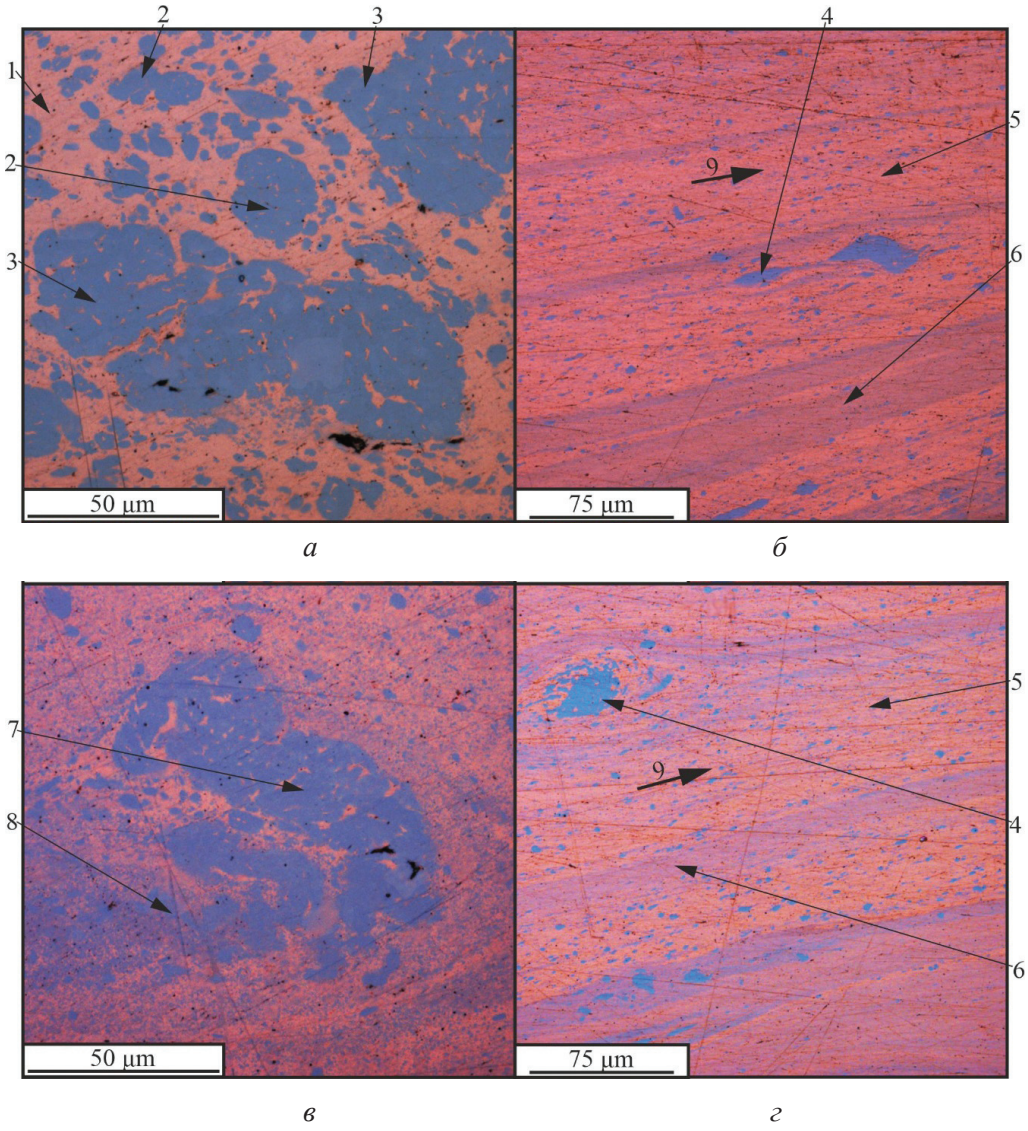


Рис. 6. Крупные частицы в структуре градиентного слоя образцов системы «М1–12Х18Н9Т» и их разрушение при фрикционной перемешивающей обработке:

а – крупные частицы в градиентной зоне необработанного образца; *б*, *в*, *г* – разрушение крупных частиц при фрикционной перемешивающей обработке; *1* – медная матрица; *2* – средние частицы; *3* – крупные частицы; *4* – частицы между слоями в процессе разрушения; *5* – слои с грубодисперсной структурой; *6* – слои мелкодисперсного строения; *7* – крупная частица в состоянии разрушения; *8* – отделившийся от частицы материал в стадии измельчения; *9* – направление течения материала

Fig. 6. Coarse particles in the structure of the copper-steel system samples gradient layer and their destruction during friction stir processing:

а – coarse particles in the gradient zone of the untreated sample; *б*, *в*, *г* – destruction of coarse particles during friction stir processing; *1* – copper matrix; *2* – medium sized particles; *3* – coarse particles; *4* – particles between layers in the destruction process; *5* – layers with coarsely dispersed structure; *6* – layers of finely dispersed structure; *7* – coarse particle in fracture state; *8* – material separated from the particle at the stage of refinement; *9* – direction of material flow

ного материала (рис. 8, *б*, *в*, *д*) можно также установить, что в материале, не прошедшем обработку, изменение концентрации химических элементов происходит скачкообразно (рис. 8, *а*) вдоль секущей. В материале после обработки распределение химических элементов в слоях с грубодисперсной структурой изменяется тоже скачкообразно, но в слоях с мелкодисперсной структурой распределение элементов происходит более однородно и изменяется достаточно плавно (рис. 8, *б*). При анализе изменения содержания химических

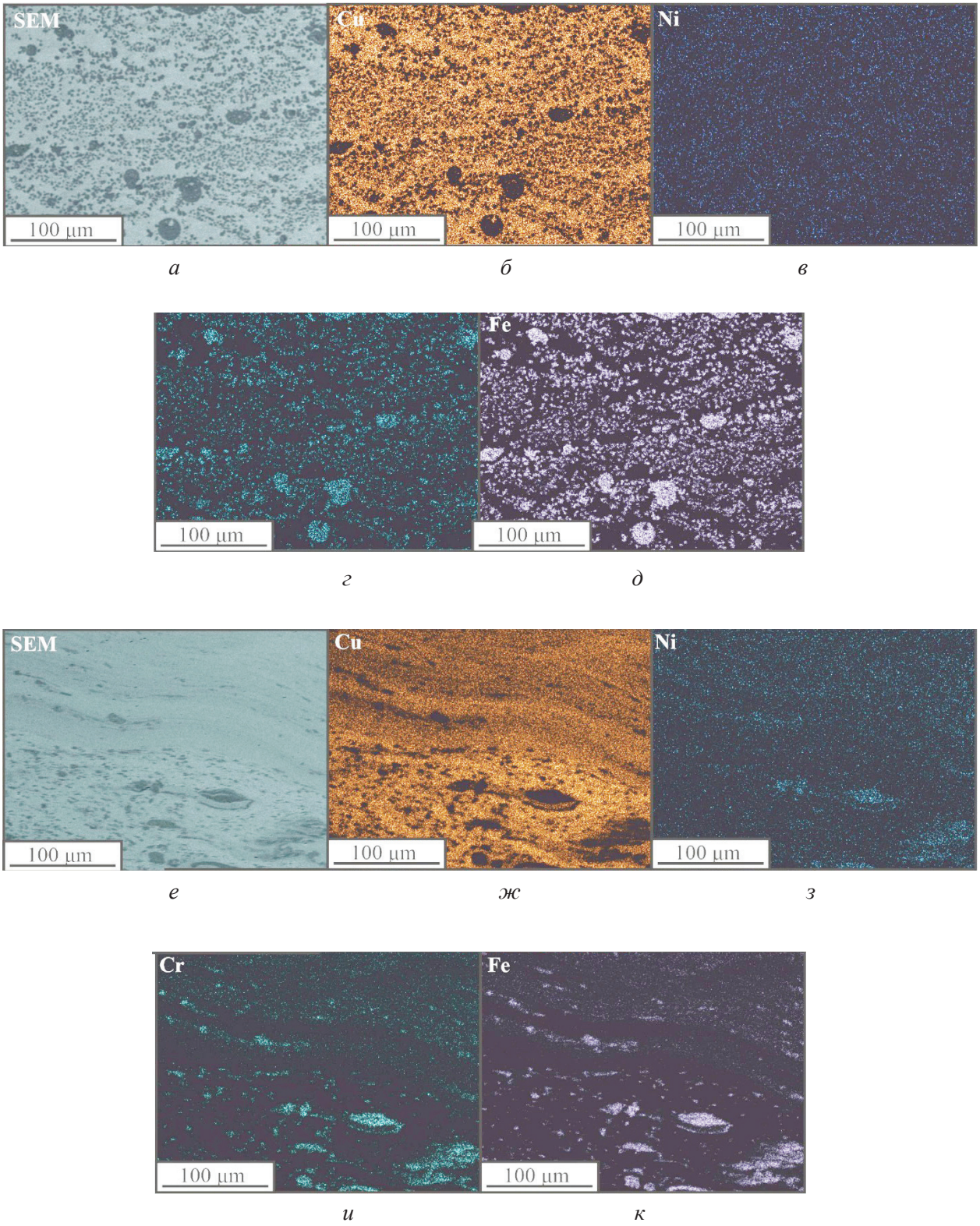


Рис. 7. Химический анализ градиентной зоны образцов микрорентгеноспектральным методом на растровом электронном микроскопе:

а–д – необработанный материал; *е–к* – обработанный материал; *а*, *е* – изображения в режиме обратно-рассеянных электронов; *б–д*, *ж–к* – карты распределения химических элементов

Fig. 7. Micro-X-ray chemical analysis of the gradient zone of samples performed using the scanning electron microscope:

а–д – unprocessed material; *е–к* – processed material; *а*, *е* – images in the backscattered electron mode; *б–д*, *ж–к* – maps of chemical elements distribution

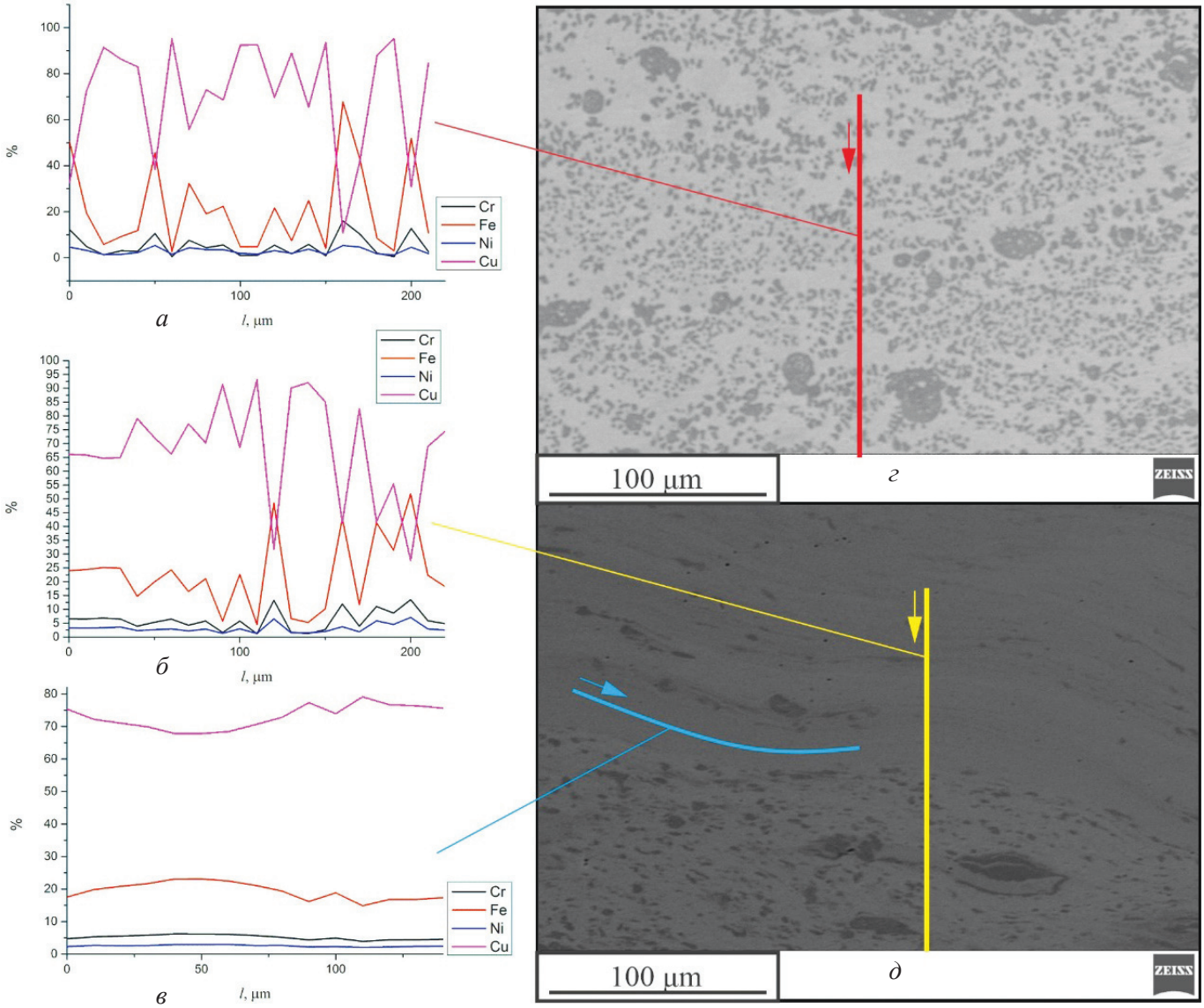


Рис. 8. Химический анализ градиентной зоны образцов микрорентгеноспектральным методом на растровом электронном микроскопе:

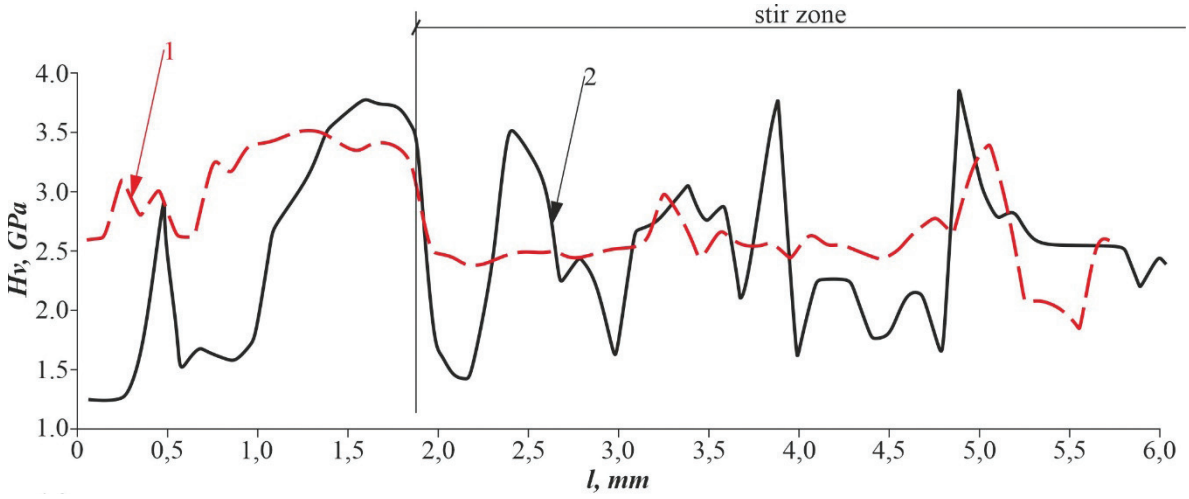
а–в – графики распределения химических элементов; *г*, *д* – изображения в режиме обратно-рассеянных электронов с указанием места съемки содержания химических элементов; *а*, *г* – необработанный образец; *б*, *в*, *д* – обработанный образец

Fig. 8. Micro-X-ray chemical analysis of the gradient zone of samples performed using the scanning electron microscope:

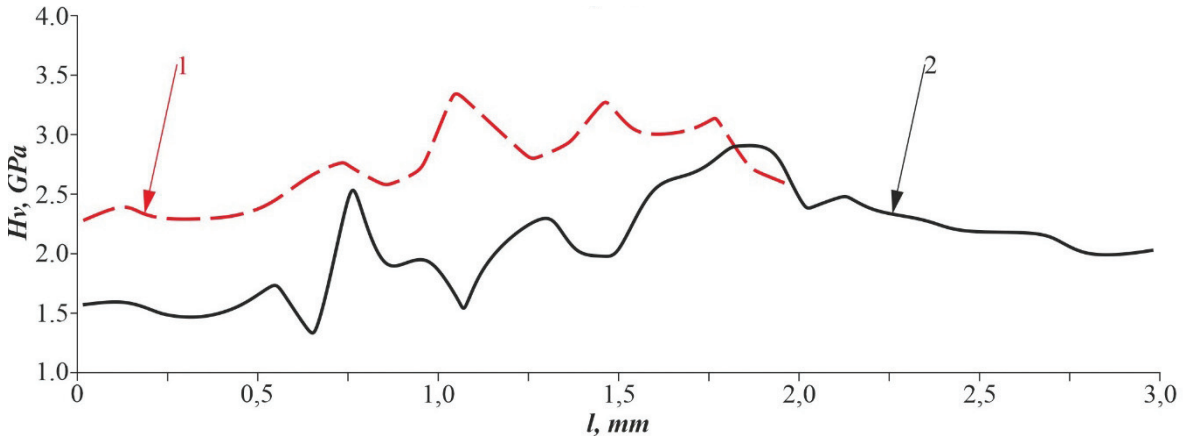
а–в – graphs of chemical elements distribution; *г*, *д* – images in the mode of backscattered electrons with indication of the chemical elements content location; *а*, *г* – unprocessed sample; *б*, *в*, *д* – processed sample

элементов вдоль слоев с мелкодисперсной структурой можно выделить более плавное и равномерное изменение содержания химических элементов вдоль слоя с высоким содержанием меди и железа.

Изменение механических свойств в материале образцов также может существенно различаться в зависимости от области образца. В горизонтальном сечении в верхней части образца *1* изменение значений микротвердости происходит более однородно (рис. 9, *а*), чем в центральной *2*. При этом в центральной части образца имеет место наибольшая величина микротвердости, о чем свидетельствуют результаты измерений микротвердости в вертикальном сечении (*1*, *2*, рис. 9, *б*). Такое положение связано с более неоднородным распределением компонентов системы в центральной



а



б

Рис. 9. Микротвердость зоны перемешивания образца:

а – в горизонтальном направлении; *б* – в вертикальном направлении; *1* – область с равномерным перемешиванием в приповерхностной зоне; *2* – область с неравномерной слоистой структурой в центральной части образца

Fig. 9. Microhardness of the sample stir zone:

а – in the horizontal direction; *б* – in the vertical direction; *1* – area with uniform stirring in the near-surface area; *2* – area with irregular layered structure in the central part of the sample

части образца с наличием большего количества крупных частиц стали в медной матрице, для которых характерны наибольшие значения микротвердости. За пределами зоны перемешивания микротвердость медной матрицы меньше, чем в зоне перемешивания по причине наличия большого количества распределенных по матрице мелких частиц γ-железа. Замешивание крупных областей стали по краям зоны перемешивания четко выделяется на графике распределения микротвердости: на рис. 9, *а* показана протяженная зона/область с высоким значением.

Заключение

В проведенной работе методом аддитивной электронно-лучевой технологии получены полиметаллические материалы из разнородных металлов с высокой и низкой степенью взаимной растворимости компонентов. В материалах с высокой степенью взаимного растворения компонентов, т. е. в полиметаллах системы «медь М1 – алюминиевый сплав АМг5», происходит формирование сложной и высокодефектной структуры границы раздела. Такое положение обусловлено, прежде всего, помимо свойств

материалов и соответствующей им диаграммы состояния выбранной схемой процесса аддитивной печати, при которой в граничной зоне происходит неконтролируемая взаимная диффузия материалов в ванне расплава за счет оплавления подложки и плавления проволочного филамента с последующим нанесением на поверхность подложки. Это приводит к образованию трещин и неоднородностей строения. По этой причине использование твердофазного термомеханического воздействия затруднительно для получения однородного строения на микроструктурном уровне.

В материалах с низкой степенью взаимного растворения компонентов в полиметаллах системы «медь М1 – сталь 12Х18Н9Т» происходит формирование сложной и неоднородной структуры с наличием крупных частиц стали в медной матрице, областей с неравномерным распределением компонентов структуры и больших объемов стали, замешанных в медную матрицу, с наличием внутри медных частиц. Это связано с низкой степенью взаимной растворимости (меди в железе ≈ 5,8 % при температуре 1083° С; железа в меди 2,8 % при температуре 1083° С [45]), не образующей в зоне перемешивания в жидком состоянии интерметаллидных прослоек и твердых растворов. В таких материалах формируемые структуры в основном не имеют дефектов в виде пор, несплошностей, растрескиваний или расслоений, но имеются выше обозначенные неоднородности структуры, связанные с неконтролируемостью процесса взаимодействия ванны расплава, формируемой при оплавлении стальной подложки и нанесением на ее поверхность расплавленного металла медного филамента.

В работе для устранения вышеуказанных недостатков применяли фрикционную перемешивающую обработку поверхности инструментом из никелевого жаропрочного сплава на глубину несколько больше толщины градиентной зоны. Полученная структура обладает слоистым строением с чередованием слоев с более крупными зернами и с зернами размером менее 0,5…1 мкм. Часть слоев формируется из наиболее деформированного материала и имеет средний размер зерен меди и частиц стали 0,5…1 мкм и меньше. Часть слоев характеризуется размером частиц стали в медной матрице 3 мкм и более. Кроме того, в слоях возможно наличие частиц стали двух или трех размеров. По химическому составу в материалах с обработанной структурой в слоях с крупными частицами четко различаются медь и γ-железо. В слоях с мелкодисперсным строением медь и железо слабо контрастируют. Распределение хрома при этом четко коррелирует с распределением железа, распределение никеля практически равномерно по всему объему как в обработанном материале, так и в необработанном. Распределение химических элементов в материале до обработки отличается существенной скачкообразностью: в материале после обработки в грубодисперсных структурах такое положение также имеется, но в слоях с более однородным характером перемешивания распределение элементов выравнивается и изменяется плавно вдоль слоя. Крупные частицы γ-железа в медной матрице при обработке начинают разрушаться, причем более интенсивное разрушение наблюдается в области слоев с мелкокристаллическим строением, что обусловлено более интенсивными деформационными процессами.

Основными недостатками полученных на данном этапе структур в полиметаллических материалах, изготовленных гибридным аддитивно-термомеханическим методом, являются неоднородности строения слоистой структуры, наличие в зоне перемешивания крупных частиц стали и формирование по краям зоны перемешивания замешиваемых слоев стали с нижележащих областей.

Таким образом, с применением комбинированного гибридного процесса, состоящего из аддитивного электронно-лучевого получения материала и фрикционной перемешивающей обработки, возможно создание в объеме поверхностных структур с изначально заданной механической смесью разнородных материалов с низкой степенью взаимного растворения. В дальнейшей работе планируется снизить неоднородность распределения компонентов полиметаллического образца после обработки и увеличить степень измельчения и перемешивания путем проведения двух, трех или многократных проходов инструментов вдоль линии обработки.

Список литературы

1. The effect of wire feed geometry on electron beam freeform 3D printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy / K.N. Kalashnikov, V.E. Rubtsov,

N.L. Savchenko, T.A. Kalashnikova, K.S. Osipovich, A.A. Eliseev, A.V. Chumaevskii // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105 (7–8). – P. 3147–3156. – DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.

2. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, N.N. Shamarin, S.V. Fortuna, G.G. Maier, E.A. Kolubaev // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 803. – P. 364–370. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.246.

3. The features of structure formation in chromium-nickel steel manufactured by a wire-feed electron beam additive process / A.V. Kolubaev, S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, Yu.A. Denisova, E.A. Kolubaev, A.I. Potekaev // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, iss. 8. – P. 1491–1498. – DOI: 10.1007/s11182-018-1561-9.

4. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, N.L. Savchenko, S.V. Fortuna, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev, S.G. Psakhie // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 99, iss. 9–12. – P. 2353–2363. – DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

5. Ultrasonic assisted second phase transformations under severe plastic deformation in friction stir welding of AA2024 / A.A. Eliseev, T.A. Kalashnikova, D.A. Gurianov, V.E. Rubtsov, A.N. Ivanov, E.A. Kolubaev // Materials Today Communications. – 2019. – Vol. 21. – P. 100660. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100660.

6. Towards aging in a multipass friction stir–processed AA2024 / K.N. Kalashnikov, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, S.V. Fortuna, A.A. Eliseev, A.N. Ivanov // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 103, iss. 5–8. – P. 2121–2132. – DOI: 10.1007/s00170-019-03631-3.

7. *Abbasi M., Givi M., Bagheri B.* Application of vibration to enhance efficiency of friction stir processing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2019. – Vol. 29, iss. 7. – P. 1393–1400. – DOI: 10.1016/S1003-6326(19)65046-6.

8. Review of friction stir processing of magnesium alloys / R.A. Kumar, S. Ramesh, E.S. Kedarvignesh, M.S.A. Arulchelvam, S. Anjunath // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 16, iss. 2. – P. 1320–1324. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.230.

9. *Ma Z.Y.* Friction stir processing technology: a review // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2008. – Vol. 39, iss. 3. – P. 642–658. – DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.

10. Understanding the mechanisms of friction stir welding based on computer simulation using particles / A.Y. Smolin, E.V. Shilko, S.V. Astafurov, E.A. Kolubaev, G.M. Eremina, S.G. Psakhie // Defence Technology. – 2018. – Vol. 14, iss. 6. – P. 643–656. – DOI: 10.1016/j.dt.2018.09.003.

11. On the Similarity of deformation mechanisms during friction stir welding and sliding friction of the AA5056 alloy / A.V. Kolubaev, A.A. Zaikina, O.V. Sizova, K.V. Ivanov, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 60, iss. 12. – P. 2123–2129. – DOI: 10.1007/s11182-018-1335-4.

12. Radioscopy of remnant joint line in a friction stir welded seam / S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev, S.F. Gnyusov, Y.A. Kudinov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, iss. 9. – P. 573–579. – DOI: 10.1134/s1061830915090090.

13. Structural phase evolution in ultrasonic-assisted friction stir welded 2195 aluminum alloy joints / A.A. Eliseev, S.V. Fortuna, T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, E.A. Kolubaev // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 60, iss. 6. – P. 1022–1026. – DOI: 10.1007/s11182-017-1172-x.

14. General regularities of the microstructure formation during friction stir welding and sliding friction / A.V. Kolubaev, E.A. Kolubaev, O.V. Sizova, A.A. Zaikina, V.E. Rubtsov, S.Yu. Tarasov, P.A. Vasiliev // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36, iss. 2. – P. 127–131. – DOI: 10.3103/s1068366615020087.

15. *Kolubaev E.A.* Investigation of the microstructure of joints of aluminum alloys produced by friction stir welding // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 57, iss. 10. – P. 1321–1327. – DOI: 10.1007/s11182-015-0384-1.

16. Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling / A.A. Eliseev, S.V. Fortuna, E.A. Kolubaev, T.A. Kalashnikova // Materials Science and Engineering A. – 2017. – Vol. 691. – P. 121–125. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.040.

17. Ultrasonic-assisted aging in friction stir welding on Al-Cu-Li-Mg aluminum alloy / S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, S.V. Fortuna, A.A. Eliseev, A.V. Chumaevsky, T.A. Kalashnikova, E.A. Kolubaev // Welding in the World. – 2017. – Vol. 61 (4). – P. 679–690. – DOI: 10.1007/s40194-017-0447-8.

18. Reactive mechanism and mechanical properties of in-situ hybrid nano-composites fabricated from an Al–Fe2O3 system by friction stir processing / G. Azimi-Roeen, S.F. Kashani-Bozorg, M. Nosko, P. Švec // Materials Characterization. – 2017. – Vol. 127. – P. 279–287. – DOI: 10.1016/j.matchar.2017.03.007.

19. Ram influence of multi-pass friction stir processing on wear behaviour and machinability of an Al-Si hypoeutectic A356 alloy / S.K. Singh, R.J. Immanuel,

S. Babu, S.K. Panigrahi, G.D. Janaki // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 236. – P. 252–262. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.05.019.

20. Cast aluminium matrix composites modified with using FSP process – Changing of the structure and mechanical properties / P. Kurtyka, N. Rylko, T. Tokarski, A. Wójcicka, A. Pietras // Composite Structures. – 2015. – Vol. 133. – P. 959–967. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.07.122.

21. Friction-stir welding of ultra-fine grained sheets of Al–Mg–Sc–Zr alloy / S. Malopheyev, S. Mironov, V. Kulitskiy, R. Kaibyshev // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 624. – P. 132–139. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.11.079.

22. Superplasticity of friction-stir welded Al–Mg–Sc sheets with ultrafine-grained microstructure alloy / S. Malopheyev, S. Mironov, I. Vysotskiy, R. Kaibyshev // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 649. – P. 85–92. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.106.

23. Friction-stir welding of an Al–Mg–Sc–Zr alloy in as-fabricated and work-hardened conditions / S. Malopheyev, V. Kulitskiy, S. Mironov, D. Zhemchuzhnikova, R. Kaibyshev // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 600. – P. 159–170. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.018.

24. Fullerene/A5083 composites fabricated by material flow during friction stir processing / Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, K. Nogi, M. Fukusumi // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2007. – Vol. 38. – P. 2097–2101. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.07.004.

25. *Lee C.J., Huang J.C.* High strain rate superplasticity of Mg based composites fabricated by friction stir processing // Materials Transactions. – 2006. – Vol. 47. – P. 2773–2778. – DOI: 10.2320/matertrans.47.2773.

26. Microstructure and mechanical property of nano-SiCp reinforced high strength Mg bulk composites produced by friction stir processing / K. Sun, Q.Y. Shi, Y.J. Sun, G.Q. Chen // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 547. – P. 32–37. – DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.071.

27. *Dixit M., Newkirk J.W., Mishra R.S.* Properties of friction stir-processed Al 1100–NiTi composite // Scripta Materialia. – 2007. – Vol. 56. – P. 541–544. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.11.006.

28. Fabrication and mechanical properties of bulk NiTip/Al composites prepared by friction stir processing / D.R. Ni, J.J. Wang, Z.N. Zhou, Z.Y. Ma // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 586. – P. 368–374. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.10.013.

29. Microstructure and mechanical property of multi-walled carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing / Q. Liu, L. Ke, F. Liu, C. Huang, L. Xing // Materials & Design. – 2013. – Vol. 45. – P. 343–348. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.036.

30. A novel way to produce bulk SiCp reinforced aluminum metal matrix composites by friction stir processing / W. Wang, Q.-Y. Shi, P. Liu, H.-K. Li, T. Li // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209. – P. 2099–2103. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.05.001.

31. Fabrication of a new Al-Al2O3-CNTs composite using friction stir processing (FSP) / Z. Du, M.J. Tan, J.F. Guo, G. Bi, J. Wei // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 667. – P. 125–131. – DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.094.

32. Debroy T., Wei H.L., Zuback J.S., et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. Debroy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

33. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys / S. Gorsse, C. Hutchinson, M. Gouné, R. Banerjee // Science and Technology of Advanced Materials. – 2017. – Vol. 18, iss. 1. – P. 1–27. – DOI: 10.1080/14686996.2017.1361305.

34. Progress in additive manufacturing on new materials: a review / N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, G. Shi, J. Blackburn // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 35, iss. 2. – P. 242–269. – DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002.

35. *Basak A., Das S.* Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing // Annual Review of Materials Research. – 2016. – Vol. 46. – P. 125–149. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.

36. Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance / J. Günther, F. Brenne, M. Droste, M. Wendler, O. Volkova, H. Biermann, T. Niendorf // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 1–14. – DOI: 10.1038/s41598-018-19376-0.

37. *Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M.* Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 110. – P. 226–235. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.

38. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: microstructure, mechanical properties and oxidation behavior / J. Wang, Z. Pan, Y. Ma, Y. Lu, C. Shen, D. Cuiuri, H. Li // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 734. – P. 110–119. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.097.

39. *Liu W.P., DuPont J.N.* Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping // Scripta Materialia. – 2003. – Vol. 48, iss. 9. – P. 1337–1342. – DOI: 10.1016/s1359-6462(03)00020-4.

40. Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting / F. Rubino, F. Scherillo, S. Franchitti, A. Squillace, A. Astarita, P. Carlone // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 37. – P. 392–401. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.015.

41. Friction welding of electron beam melted Ti-6Al-4V / P.T. Qin, R. Damodaram, T. Maity, W.W. Zhang, C. Yang, Z. Wang, K.G. Prashanth // Materials Science and Engineering A. – 2019. – Vol. 761. – P. 138045. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138045.

42. Friction stir welding of additively manufactured Ti-6Al-4V: microstructure and mechanical properties / A.K. Singh, B. Kumar, K. Jha, A. Astarita, A. Squillace, S. Franchitti, A. Arora // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 277. – P. 116433. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116433.

43. Закономерности формирования материалов с композитной структурой с использованием аддитивной электронно-лучевой технологии, сварки трением с перемешиванием и фрикционной перемешивающей обработки / Т.А. Калашникова, А.В. Гусарова, А.В. Чумаевский, Е.О. Княжев, М.А. Шведов, П.А. Васильев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 94–112. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-94-112.

44. Peculiarities of structure formation in copper/steel bimetal fabricated by electron-beam additive technology / K.S. Osipovich, A.V. Chumaevskii, A.A. Eliseev, K.N. Kalashnikov, E.A. Kolubaev, V.E. Rubtsov, E.G. Astafurova // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, iss. 8. – P. 1486–1494. – DOI: 10.1007/s11182-019-01867-w.

45. *Шухардина С.В.* Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. – М.: Наука, 1979. – 247 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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 114–135
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-114-135

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Patterns of Structure Formation in Materials obtained by Hybrid Additive-Thermomechanical Method

Anastasia Gusarova [a], *Andrey Chumaevskii* [b, *], *Ksenia Osipovich* [c], *Tatiana Kalashnikova* [d], *Kirill Kalashnikov* [e]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-4208-7584, gusarova@ispms.ru, [b] https://orcid.org/0000-0002-1983-4385, tch7av@gmail.com,
[c] https://orcid.org/0000-0001-9534-775X, osipovich_k@ispms.tsc.ru, [d] https://orcid.org/0000-0002-0388-4011, gelombang@ispms.tsc.ru,
[e] https://orcid.org/0000-0002-0286-7156, sso.spektr.asu@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 December 2019
Revised: 10 January 2019
Accepted: 14 February 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Friction stir processing
Electron-beam additive manufacturing
Structural-phase state
Mechanical properties
Polymetallic materials
Hybrid technologies

Funding
The work on obtaining and studying the samples structure through the additive manufacturing method and the friction stir processing was performed within the frame of the Fundamental Research Program of the State Academies of Sciences for 2013-2020, line of research III.23. The works on obtaining the materials of the Cu-Al system using the electron-beam additive manufacturing method were supported by the Russian Scientific Foundation (project № 19-79-00136).

ABSTRACT

Introduction. At present, the methods of additive manufacturing technologies for obtaining metallic materials of different chemical and phase composition are being actively developed. Wire technology is based on the electron-beam melting method and is one of the most promising technologies that allows, in addition to obtaining complex shaped components, to create materials with unique gradient layered structure. But such technologies allow obtaining products with the structure of cast unhardened material with a coarse crystalline structure and irregular component distribution of the used material. In order to achieve a homogeneous structure of the obtained materials, as well as to strengthen the material and refine the grains, it is possible to use additional friction stir processing, which can change the distribution of polymetallic sample components with the formation of the structure, which is not achievable by any available methods. From the above, the problem of grain refinement, material hardening and obtaining a homogeneous structure during the polymetallic materials manufacturing from similar and dissimilar metals and alloys is an important one at present. In this paper, a combination of additive electron-beam manufacturing and friction stir processing techniques is used to solve this problem. The approach consists in the effect of the severe plastic deformation method on the gradient transition of a polymetallic product fabricated by additive manufacturing. **The aim of this work** is to study the macrostructural regularities of polymetallic samples formation by the additive electron-beam manufacturing method, which forms mechanical mixtures (Cu-Fe), solid solutions and intermetallic compounds (Cu-Al) in the contact zone. The peculiarities of bimetal samples formation from similar and dissimilar metals, obtained by additive method, and regularities of structural changes in materials of Cu-Fe system after hybrid additive-thermomechanical processing are **investigated in the work**. **The research methods** are optical and scanning electron microscopy as well as analysis of micromechanical properties by the microhardness measurement in different sections of the obtained samples. **Results of the study.** The structural changes in the materials obtained by additive method depending on the polymetallic material phase types are revealed. The received data indicate a uniform distribution of the polymetallic sample components in the structural gradient zone, which do not form intermetallic phases and solid solutions in the contact zone. The regularities of plastic deformation and fragmentation in the Cu-Fe system (copper M1 - steel 321) after friction stir processing were determined using scanning electron microscopy, micro-X-ray spectral analysis and optical microscopy. The data obtained demonstrate the formation of metal flows in the stir zone towards the contour of the tool. The material layers have different grain size, peculiarities of copper and steel particles distribution, and also chemical elements distribution regularities. On the edges of the stir zone there is excessive mixing into the upper material layers from the underlying steel layers. In the stir zone there is a heterogeneity of structure that occurs in the distribution of individual layers, their thickness, grain size and volume fraction of different phases.

For citation: Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Kalashnikova T.A., Kalashnikov K.N. Patterns of Structure Formation in Materials obtained by Hybrid Additive-Thermomechanical Method. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp 114–135. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-114-135. (In Russian).

*** Corresponding author**
Chumaevskii Andrey V., Scientific associate
Institute of Strenght Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: 8 (961) 891-41-49, **e-mail:** tch7av@gmail.com

References

1. Kalashnikov K.N., Rubtsov V.E., Savchenko N.L., Kalashnikova T.A., Osipovich K.S., Eliseev A.A., Chumaevskii A.V. The effect of wire feed geometry on electron beam freeform 3D printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, iss. 7–8, pp. 3147–3156. DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.

2. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Shamarin N.N., Fortuna S.V., Maier G.G., Kolubaev E.A. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 803, pp. 364–370. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.246.

3. Kolubaev A.V., Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Denisova Yu.A., Kolubaev E.A., Potekaev A.I. The features of structure formation in chromium-nickel steel manufactured by a wire-feed electron beam additive process. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61, iss. 8, pp. 1491–1498. DOI: 10.1007/s11182-018-1561-9.

4. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Savchenko N.L., Fortuna S.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Psakhie S.G. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, iss. 9–12, pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

5. Eliseev A.A., Kalashnikova T.A., Gurianov D.A., Rubtsov V.E., Ivanov A.N., Kolubaev E.A. Ultrasonic assisted second phase transformations under severe plastic deformation in friction stir welding of AA2024. *Materials Today Communications*, 2019, vol. 21, p. 100660. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100660.

6. Kalashnikov K.N., Tarasov S.Yu., Chumaevskii A.V., Fortuna S.V., Eliseev A.A., Ivanov A.N. Towards aging in a multipass friction stir–processed AA2024. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, iss. 5–8, pp. 2121–2132. DOI: 10.1007/s00170-019-03631-3.

7. Abbasi M., Givi M., Bagheri B. Application of vibration to enhance efficiency of friction stir processing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of Chin*, 2019, vol. 29, iss. 7, pp. 1393–1400. DOI: 10.1016/S1003-6326(19)65046-6.

8. Kumar R.A., Ramesh S., Kedarvignesh E.S., Arulchelvam M.S.A., Anjunath S. Review of friction stir processing of magnesium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 1320–1324. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.230.

9. Ma Z.Y. Friction stir processing technology: a review. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, vol. 39, iss. 3, pp. 642–658. DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.

10. Smolin A.Y., Shilko E.V., Astafurov S.V., Kolubaev E.A., Eremina G.M., Psakhie S.G. Understanding the mechanisms of friction stir welding based on computer simulation using particles. *Defence Technology*, 2018, vol. 14, iss. 6, pp. 643–656. DOI: 10.1016/j.dt.2018.09.003.

11. Kolubaev A.V., Zaikina A.A., Sizova O.V., Ivanov K.V., Filippov A.V., Kolubaev E.A. On the similarity of deformation mechanisms during friction stir welding and sliding friction of the AA5056 alloy. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 60, iss. 12, pp. 2123–2129. DOI: 10.1007/s11182-018-1335-4.

12. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Gnyusov S.F., Kudinov Y.A. Radioscopy of remnant joint line in a friction stir welded seam. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2015, vol. 51, iss. 9, pp. 573–579. DOI: 10.1134/s1061830915090090.

13. Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kolubaev E.A. Structural phase evolution in ultrasonic-assisted friction stir welded 2195 aluminum alloy joints. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, iss. 6, pp. 1022–1026. DOI: 10.1007/s11182-017-1172-x.

14. Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Sizova O.V., Zaikina A.A., Rubtsov V.E., Tarasov S.Yu., Vasiliev P.A. General regularities of the microstructure formation during friction stir welding and sliding friction. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, iss. 2, pp. 127–131. DOI: 10.3103/s1068366615020087.

15. Kolubaev E.A. Investigation of the microstructure of joints of aluminum alloys produced by friction stir welding. *Russian Physics Journal,* 2015, vol. 57, iss. 10, pp. 1321–1327. DOI: 10.1007/s11182-015-0384-1.

16. Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kolubaev E.A., Kalashnikova T.A. Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling. *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 691, pp. 121–125. DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.040.

17. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Fortuna S.V., Eliseev A.A., Chumaevsky A.V., Kalashnikova T.A., Kolubaev E.A. Ultrasonic-assisted aging in friction stir welding on Al-Cu-Li-Mg aluminum alloy. *Welding in the World*, 2017, vol. 61, iss. 4, pp. 679–690. DOI: 10.1007/s40194-017-0447-8.

18. Azimi-Roeen G., Kashani-Bozorg S.F., Nosko M., Švec P. Reactive mechanism and mechanical properties of in-situ hybrid nano-composites fabricated from an Al–Fe2O3 system by friction stir processing. *Materials Characterization*, 2017, vol. 127, pp. 279–287. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.03.007.

19. Singh S.K., Immanuel R.J., Babu S., Panigrahi S.K., Janaki G.D. Ram Influence of multi-pass friction stir processing on wear behaviour and machinability of an Al-Si hypoeutectic A356 alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 236, pp. 252–262. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.05.019.

20. Kurtyka P., Rylko N., Tokarski T., Wójcicka A., Pietras A. Cast aluminium matrix composites modified with using FSP process – Changing of the structure and mechanical properties. *Composite Structures*, 2015, vol. 133, pp. 959–967. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.07.122.

21. Malopheyev S., Mironov S., Kulitskiy V., Kaibyshev R. Friction-stir welding of ultra-fine grained sheets of Al–Mg–Sc–Zr alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 624, pp. 132–139. DOI: 10.1016/j.msea.2014.11.079.

22. Malopheyev S., Mironov S., Vysotskiy I., Kaibyshev R. Superplasticity of friction-stir welded Al–Mg–Sc sheets with ultrafine-grained microstructure. *Materials Science and Engineering: A,* 2016, vol. 649, pp. 85–92. DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.106.

23. Malopheyev S., Kulitskiy V., Mironov S., Zhemchuzhnikova D., Kaibyshev R. Friction-stir welding of an Al–Mg–Sc–Zr alloy in as-fabricated and work-hardened conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 600, pp. 159–170. DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.018.

24. Morisada Y., Fujii H., Nagaoka T., Nogi K., Fukusumi M. Fullerene/A5083 composites fabricated by material flow during friction stir processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, vol. 38, pp. 2097–2101. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.07.004.

25. Lee C.J., Huang J.C. High strain rate superplasticity of Mg based composites fabricated by friction stir processing. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, pp. 2773–2778. DOI: 10.2320/matertrans.47.2773.

26. Sun K., Shi Q.Y., Sun Y.J., Chen G.Q. Microstructure and mechanical property of nano-SiCp reinforced high strength Mg bulk composites produced by friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A,* 2012, vol. 547, pp. 32–37. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.071.

27. Dixit M., Newkirk J.W., Mishra R.S. Properties of friction stir-processed Al 1100–NiTi composite. *Scripta Materialia*, 2007, vol. 56, pp. 541–544. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.11.006.

28. Ni D.R., Wang J.J., Zhou Z.N., Ma Z.Y. Fabrication and mechanical properties of bulk NiTip/Al composites prepared by friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 586, pp. 368–374. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.10.013.

29. Liu Q., Ke L., Liu F., Huang C., Xing L. Microstructure and mechanical property of multi-walled carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing. *Materials & Design*, 2013, vol. 45, pp. 343–348. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.036.

30. Wang W., Shi Q.-Y., Liu P., Li H.-K., Li T. A novel way to produce bulk SiCp reinforced aluminum metal matrix composites by friction stir processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, pp. 2099–2103. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.05.001.

31. Du Z., Tan M.J., Guo J.F., Bi G., Wei J. Fabrication of a new Al-Al2O3-CNTs composite using friction stir processing (FSP). *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 667, pp. 125–131. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.094.

32. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

33. Gorsse S., Hutchinson C., Gouné M., Banerjee R. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2017, vol. 18, iss. 1, pp. 1–27. DOI: 10.1080/14686996.2017.1361305.

34. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, vol. 35, iss. 2, pp. 242–269. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002.

35. Basak A., Das S. Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 2016, vol. 46, pp. 125–149. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.

36. Günther J., Brenne F., Droste M., Wendler M., Volkova O., Biermann H., Niendorf T. Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, pp. 1–14. DOI: 10.1038/s41598-018-19376-0.

37. Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 2016, vol. 110, pp. 226–235. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.

38. Wang J., Pan Z., Ma Y., Lu Y., Shen C., Cuiuri D., Li H. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: microstructure, mechanical properties and oxidation behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 734, pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.097.

39. Liu W.P., DuPont J.N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping. *Scripta Materialia*, 2003, vol. 48, iss. 9, pp. 1337–1342. DOI: 10.1016/s1359-6462(03)00020-4.

40. Rubino F., Scherillo F., Franchitti S., Squillace A., Astarita A., Carlone P. Microstructure and surface analysis of friction stir processed Ti-6Al-4V plates manufactured by electron beam melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 37, pp. 392–401. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.015.

41. Qin P.T., Damodaram R., Maity T., Zhang W.W., Yang C., Wang Z., Prashanth K.G. Friction welding of electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 761, p. 138045. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138045.

42. Singh A.K., Kumar B., Jha K., Astarita A., Squillace A., Franchitti S., Arora A. Friction stir welding of additively manufactured Ti-6Al-4V: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 277, p. 116433. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116433.

43. Kalashnikova T.A., Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Knyazhev E.O., Shvedov M.A., Vasilyev P.A. Regularities of composite materials formation using additive electron-beam technology, friction stir welding and friction stir processing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 94–112. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4- 94-112. (In Russian).

44. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Astafurova E.G. Peculiarities of structure formation in copper/steel bimetal fabricated by electron-beam additive technology. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, iss. 8, pp. 1486–1494. DOI: 10.1007/s11182-019-01867-w.

45. Shukhardina S.V. *Dvoinye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Binary and multicomponent systems based on copper]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 247 p.

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 (***I****ntroduction*);
• методы (***M****ethods*);
• результаты (***R****esults*);
• обсуждение (***D****iscussion*);
• заключение (*Conclusion*);
• благодарности, финансирование (*Acknowledgements* / *Funding*);
• список литературы (*References*).

ЗАГЛАВИЕ

Название должно отражать основную идею выполненного исследования и быть по возможности кратким.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны имя и фамилия автора (ов). Ниже – полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов обязательно указываются его уникальный идентификационный код *ORCID* (*Open Researcher and Contributor ID*) и электронная почта (***e-mail***). Если отсутствует *ORCID*, то необходимо пройти по ссылке https://orcid.org/ и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Указывается индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Для англоязычной части статьи УДК указывать не надо.

Ключевые слова

Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний) должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

АННОТАЦИЯ (РЕФЕРАТ)

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200…250 слов. **Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!** Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ

Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подход, данные или анализ). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию обозначенной проблемы. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

МЕТОДЫ / МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.

2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и прочее; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации, перечисленные выше, актуальны также и для теоретической, и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без выявления причинно-следственных связей не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел, для того чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов, а также для упорядочения и интерпретации результатов. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и обозначить перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие ***DOI*** публикации. Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать 15–17 %. Если работа была издана и на русском и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в ***References*** лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе ***BSI*** (см. http://ru.translit.net/?account=bsi). Правила оформления англоязычного блока статьи представлены на сайте журнала в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) …».

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, 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.

Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНИТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в авторском резюме не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее 100–250 слов (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из девяти последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на базе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменяемости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic

planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via 1H or 31P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative 13C-glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by 31PMR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.

2. Кратко излагая основные факты работы, помните следующие моменты:

– следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

– не включать несущественные детали;

– вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение, а также имейте в виду, что вы пишете для международной аудитории;

– текст должен быть связным, с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example»,» the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого;

– необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. "The study tested", но не "It was tested in this study" (частая ошибка российских аннотаций);

– стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

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=hdac5

rtkb73ae013ofk4g8nrv1.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые Авторы, внимательно ознакомьтесь с правилами оформления статьи на сайте журнала!

ШАБЛОН ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Синим цветом обозначены пояснения относительно того, что именно и как должно быть написано в данном разделе / подразделе.

После внесения соответствующих правок в разделы статьи необходимо удалить синие подсказки. В шаблон следует поместить все материалы и данные, которые, по вашему мнению, должны быть напечатаны в журнале (в том числе рисунки и таблицы). Заполненный шаблон статьи следует сохранить на компьютере и загрузить на сайт журнала.

Структурные особенности плазменных покрытий B_4C-Ni-P

(Заглавие статьи на русском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Елена Корниенко [1, a,*], ***Виктор Кузьмин*** [2, b], ***Александр Сивков*** [3, c]

(Полный список авторов с указанием ФИО Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

[1] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[2] Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

[a] http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, kornienko_ee@mail.ru, [b] http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, vikuzmin57@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке https://orcid.org/ и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71 *(Указывается индекс универсальной десятичной классификации)*

История статьи:
Поступила: 1 июня 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*
Рецензирование: *(Дата указывается редакцией)*
Принята к печати: *(Дата указывается редакцией)*
Доступно онлайн: *(Дата указывается редакцией)*

Ключевые слова:
Плазменное напыление,
Карбид бора,
B_4C-Ni-P,
Покрытие.
(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

АННОТАЦИЯ

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **200…250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Для цитирования: *Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Сивков А.А.* Структурные особенности плазменных покрытий B_4C-Ni-P // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 30–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50.

(Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

***Адрес для переписки**
Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-11-71, **e-mail:** kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

Основная часть статьи

1. Введение

До двух страниц краткий обзор литературы по проблеме исследования, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована **цель** и **задачи** исследований.

2. Методика исследований

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

3. Результаты и их обсуждение

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации по набору текста

Текст набирается в русифицированном редакторе Microsoft Word. Формат оригиналов – А4. Старайтесь использовать только следующие шрифты: Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв. Размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст статьи.

Не используйте более одного пробела – применяйте абзацные отступы и табуляцию.

Не заканчивайте строку нажатием клавиши «Enter» – используйте ее только для начала нового абзаца.

Реализуйте возможности, предоставляемые текстовым редактором: автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т.п.

Не набирайте кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами, и наоборот.

Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев.

Недопустимо тире «–» заменять дефисом «-».

В тексте и формулах (в том числе в индексах) латинские буквы набираются курсивом, а греческие и русские – прямым шрифтом.

Десятичные цифры в русскоязычных текстах набираются через запятую (0,5), а в англоязычных – через точку (0.25 вместо 0,25).

Рекомендации по набору формул

Формулы, структурные химические формулы и схемы располагаются по месту в тексте статьи.

Знаки *, ′, ±, одиночные буквы греческого алфавита, одиночные наклонные или полужирные буквы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения, цифры в тексте, а также простые математические или химические формулы (например, $a^2 + b^2 = c^2$, H_2SO_4) должны набираться в текстовом режиме **без использования редактора формул.**

Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться с использованием редактора формул (Microsoft Equation). Набор формул из составных элементов, где часть формулы – таблица, часть – текст, часть – внедренная рамка, не допускается.

Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения. Их принудительное ручное изменение для отдельных символов или элементов формул не допускается!

Рекомендации по набору таблиц

Таблицы располагаются в тексте рукописи.

Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать ее **название** (**на русском и на английском языке!**).

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения. Например: *t*, °C; *V*, об.%; HV, МПа и т.п.

Сокращения слов в таблицах не допускаются.

Создавайте таблицы, используя возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы, набранные вручную с помощью пробелов или табуляций, не могут быть использованы.

Таблица
Table

Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия
The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

№ участка / No area	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0.08	86.55	13.03	0.3	0.02
2	57.71	22.73	8.22	2.12	9.22
3	40.37	44.53	10.23	2	2.87
4	49.65	25.69	13.10	3.23	8.33
5	44.26	26.06	7.35	9.36	12.97

Сокращения и аббревиатуры

Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

Сокращения из нескольких слов разделяются пробелами (760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр.), за исключением общеупотребительных (и т.д.; и т.п.; т.е.) и аббревиатур (РФА, КПД и т.п.).

Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: ИК-спектроскопия, ПЭ-пленка, ЖК-состояние, Na^+-форма, ОН-группа, но группа ОН.

Размерности

Размерности отделяются от цифры пробелом (17,5 моль/м^3 (17.5 mol/m^3); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с^2 ,20 °C, 50 %, 10 ‰), кроме угловых градусов (90°).

Точка после размерностей не ставится (с – секунда, г – грамм, сут – сутки, град – градус). В сложных размерностях обязательно указывается знак умножения (·): Н·м/с или кг/(с· м· Па).

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней: Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$ или J ·mol^{-1}·K^{-1}, так и скобок: J/(mol · К) или J · (mol · К)$^{-1}$, если это облегчает их прочтение.

Главное условие – соблюдение единообразия одинаковых размерностей по статье.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (10, 15 и 45 мин; от 18 до 20 мм; 30–40 Дж/моль), за исключением угловых градусов: 5°–10°, а не 5–10°.

Размерности переменных пишутся через запятую (*E*, Дж/моль или *E*, J/mol), а подлогарифмических величин – в квадратных скобках, без запятой: ln *t* [мин].

Точки и пробелы

Точка не ставится после названия статьи, списка авторов, списка организаций, заголовков и подзаголовков, названий таблиц и подрисуночных подписей.

Точка после сокращений не ставится в подстрочных индексах ($T_{пл}$ – температура плавления).

Ссылки на рисунки и таблицы набираются с пробелами (рис. 5, табл. 2).

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 300 К), (а).

Между знаком номера или параграфа и числом должен быть пробел (№ 1; § 5.5).

Числа с буквами в обозначениях набирают без пробелов (IVd; 1.3.14a; рис. 1,*а*).

В географических координатах широты отделяются пробелами: 56,5 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °Е.

В географических названиях после точки ставится пробел: р. Енисей, г. Новосибирск.

Требования к иллюстрациям

Иллюстрации и подписи к ним располагаются в тексте рукописи.

Иллюстрации нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (**на русском и на английском языке!**).

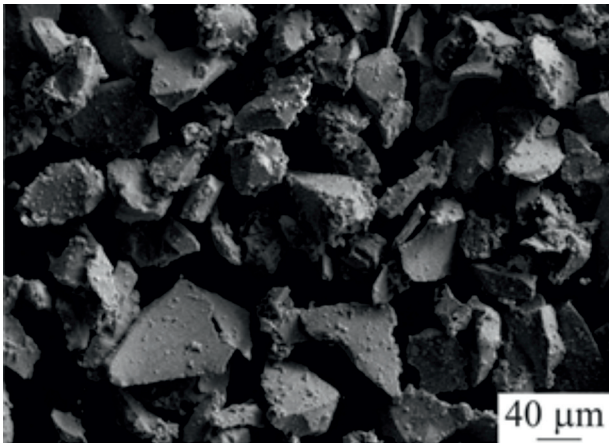


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка B_4C-Ni-P

Fig. 1. The particles of B_4C-Ni-P powder

Общие технические требования:

иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку) либо 17–17,5 см (на две колонки);

надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому для фотографий желательно предоставить второй вариант без текста и всех обозначений, для остальных иллюстраций – располагать надписи на иллюстрации так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

на фотографиях (например, структур) обязательно должны быть указаны размерные метки;

для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки;

графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;
- толщина линий должна быть не меньше 0,5 pt;

● векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как «Noise» «Black&white noise» «Top noise;

● для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

Штриховые иллюстрации и полутоновые иллюстрации:

– должны иметь разрешение не ниже 300 dpi;

комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

– должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4. Выводы

Выводы по результатам работы, описанным в данной статье, должны быть лаконичным.

Список литературы

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области.

Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации.

Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.

Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте.

Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий.

Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности.

Ссылки на неопубликованные работы недопустимы.

Самоцитирование не должно превышать 15–17 %.

Если работа была издана и на русском, и на английском языке (или других), то в Списке литературы и в References лучше давать ссылку на переводную работу.

В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5-2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. http://ru.translit.net/?account=bsi).

Финансирование

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) …».

Конфликт интересов

Указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем авторы статьи считают его значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Англоязычный блок статьи

Structure features of B_4C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Elena Kornienko [1, a,*], ***Viktor Kuz'min*** [2, b], ***Alexander Sivkov*** [3, c]

(Полный список авторов с указанием ФИО Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2] Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
[3] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

[a] http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, kornienko_ee@mail.ru, [b] http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, vikuzmin57@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке https://orcid.org/ и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.)

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 1 June 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*
Revised: *(Дата указывается редакцией)*
Accepted: *(Дата указывается редакцией)*
Available online: *(Дата указывается редакцией)*

Keywords:
Plasma praying
Boron carbide
B_4C-Ni-P
Coating
(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

ABSTRACT

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

For citation: Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Sivkov A.A. Structure Features of B_4C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 30–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50. (in Russian)

(Авторами указывается примерная ссылка на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта)

* Corresponding author
Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 (383) 346-11-71, **e-mail:** kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

References

(Список используемой литературы на английском языке подготавливается согласно правилам, представленным на сайте журнала)

Funding (*Финансирование)*

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Conflicts of Interest (Конфликт интересов)

(Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest**».)

Acknowledgements (Выражение признательности)

(Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Сведения для РИНЦ

Раздел **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

[1]Корниенко Елена Евгеньевна, [2]Кузьмин Виктор Иванович, [3]Сивков Александр Анатольевич

[1]Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[2]Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия
[3]Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

Корниенко Е.Е. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, e-mail: kornienko_ee@mail.ru
Кузьмин В.И. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, e-mail: vikuzmin57@mail.ru
Сивков А.А. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Структурные особенности плазменных покрытий B_4C-Ni-P

Аннотация

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200…250 слов). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

УДК 621.793.71

Ключевые слова:
плазменное напыление, карбид бора, B_4C-Ni-P, покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed B_4C / H. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // Coating Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 1216-1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

(Список литературы оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50%) долей зарубежных источников.)

Финансирование статьи:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Дата поступления: 01.06.2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Раздел **MATERIAL SCIENCE**

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

[1] Kornienko Elena E., [2] Kuz'min Viktor I., [3] Sivkov Alexander A.

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2] Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
[3] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Kornienko E.E. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5874-5422, e-mail: kornienko_ee@mail.ru
Kuz'min V.I. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9951-7821, e-mail: vikuzmin57@mail.ru
Sivkov A.A. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7685-5502, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Structure features of B_4C-Ni-P plasma coatings

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Keywords:
Plasma praying, Boron carbide, B_4C-Ni-P, Coating

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. ***Публикация статей бесплатная.***

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: **«Технология»**, **«Оборудование»**, **«Инструменты»**, **«Материаловедение»**, **«Научно-техническая информация»** и др.

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 %

- 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

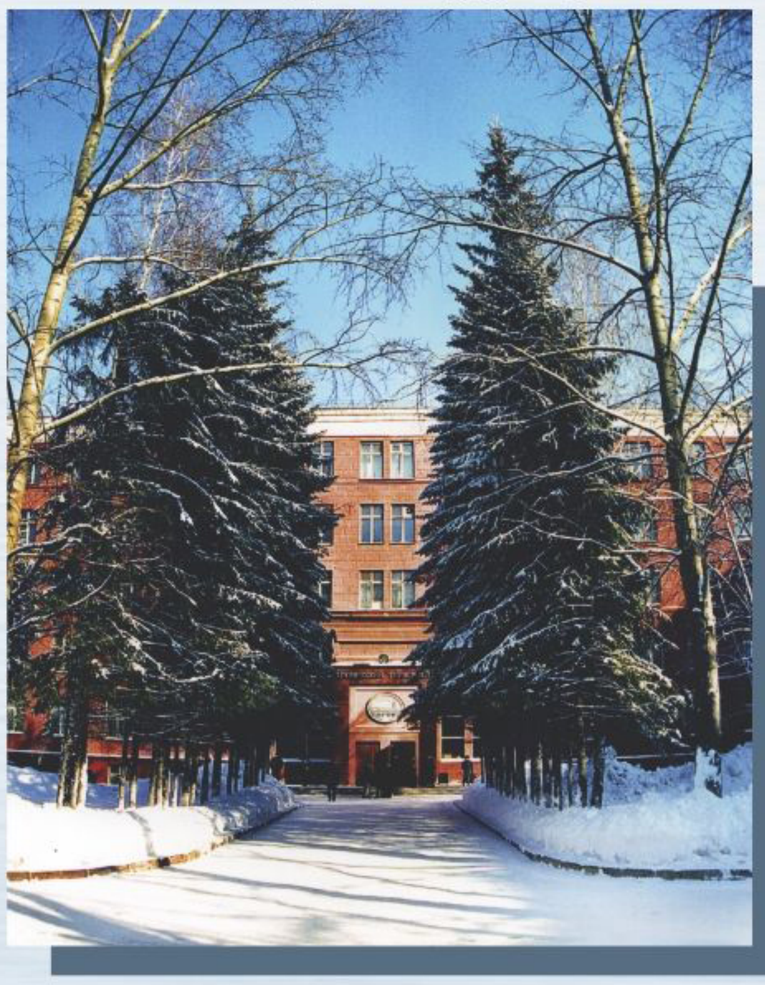
С 2015 г. опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор - *Digital Object Identifier* (*DOI*). Метаданные каждой работы обязательно регистрируются в международном реестре научно-информационных материалов *CrossRef*.

Журнал индексируется в зарубежных базах данных и агрегаторах:

- Emerging Sources Citation Index (ESCI) Web of Science Core Collection;
- EBSCO (core) в базе «Applied Science & Technology Source Ultimate»;
- Ulrich's Periodicals Directory;
- ICI Journals Master List
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

Журнал представлен:

- сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- база данных eLibrary.ru, журнал индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- реферативный журнал и база данных ВИНИТИ;



МЕРОПРИЯТИЯ

С 2014 г. научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ITE Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлобработки 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/