

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 23, Номер 4

ОКТАБРЬ – ДЕКАБРЬ 2021

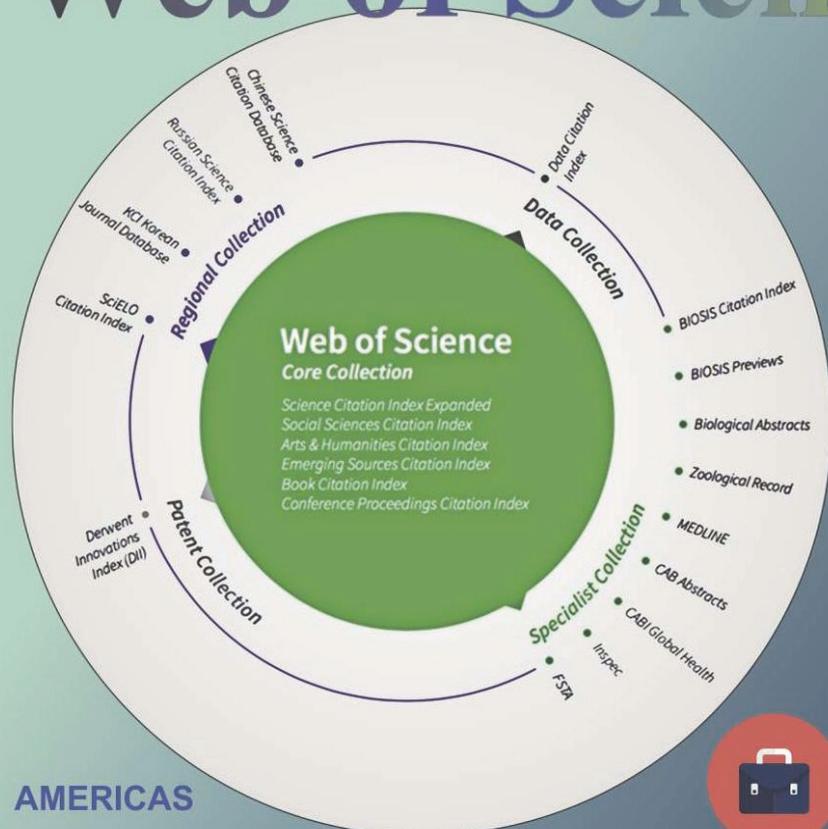
ОБРАБОТКА **М**ЕТАЛЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science



Academic Search™ Ultimate



Applied Science & Technology Source™ Ultimate



Business Source® Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

EBSCO

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

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

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete
office list, visit:
clarivate.com

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 23 № 4 2021 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 РАН, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Лобанов Д.В.**, доктор техн. наук, доцент, ЧГУ, г. Чебоксары, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, член-корреспондент РАН, ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары

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

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

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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

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

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

Адрес редакции и издателя:

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

Тел. +7 (383) 346-17-75

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

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

Цена свободная

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

- Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М.** Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ..... 6
- Шеладия М.В., Ачарья С.Г., Котари А.М., Ачарья Г.Д.** Применение техники цифровой обработки изображений в анализе микроструктуры и исследовании обрабатываемости..... 21
- Бузаев Д.А., Зубков Н.Н.** Влияние параметров сквозного деформирующего резания на характер получаемых щелевых фильтрующих структур..... 33

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

- Кулкарни А.П., Чинчаникар С., Саргаде В.Г.** Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка-инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей..... 47
- Васильев С.А., Алексеев В.В., Федорова А.А., Лобанов Д.В.** Исследование сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств мехатронным профилографом..... 65
- Ефимович И.А., Золотухин И.С.** Исследование напряженно-деформированного и температурного состояния режущей части инструмента с использованием лазерной интерферометрии..... 79

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Муратов К.Р., Венедиктов А.Н.** Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства..... 93
- Фёдоров В.В., Рыгин А.В., Клименов В.А., Мартюшев Н.В., Клопотов А.А., Стрелкова И.Л., Матренин С.В., Батрагин А.В., Дерюшева В.Н.** Структурные и механические свойства нержавеющей стали, сформированной в условиях послойного сплавления проволоки электронным лучом..... 111
- Захарченко К.В., Капустин В.И., Ларичкин А.Ю.** Ускоренная оценка влияния технологических факторов на прочностные характеристики Ti-6Al-4V и Al-Cu-Mg..... 125
- Калашникова Т.А., Белобородов В.А., Осипович К.С., Воронцов А.В., Калашников К.Н.** Закономерности течения материала по контуру инструмента и стабильность механических свойств материала зоны перемешивания при СТП образцов сплава AMg5 больших толщин..... 140
- Крутский Ю.Л., Максимовский Е.А., Петров Р.В., Нецкина О.В., Ухина А.В., Крутская Т.М., Гудыма Т.С.** Синтез карбида и диборида титана для металлообработки и получения керамики..... 155

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

- Рекомендации по написанию научной статьи 167
- Подготовка аннотации 171
- Правила для авторов 175

МАТЕРИАЛЫ СОУЧЕРЕДИТЕЛЕЙ

183

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 29.11.2021. Выход в свет 13.12.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 23,0. Уч.-изд. л. 42,78. Изд. № 177. Заказ 730. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA OMETALLOV

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 23 No.4 2021 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

Editor of the English translation:

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

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year



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

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



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



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

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

☎ Tel.: +7 (383) 346-17-75

🌐 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

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

**EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:**

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Spain:

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Yusubov N.D., Abbasova H.M.** Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on CNC multi-purpose machines..... 6
- Sheladiya M.V., Acharya S.G., Kothari A.M., Acharya G.D.** Application of digital image processing technique in the microstructure analysis and the machinability investigation..... 21
- Buzaev D.A., Zubkov N.N.** Influence of the parameters of deforming cutting on the features of the resulting slotted filter structures..... 33

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

- Kulkarni A.P., Chinchankar S., Sargade V.G.** Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304..... 47
- Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Fedorova A.A., Lobanov D.V.** Investigation of complex surfaces of propellers of vehicles by a mechatronic profilograph..... 65
- Efimovich I.A., Zolotukhin I.S.** Study of the stress-strain and temperature fields in cutting tools using laser interferometry..... 79

MATERIAL SCIENCE

- Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N.** Assessment of the effect of the steels structure dispersion on its magnetic and mechanical properties..... 93
- Fedorov V.V., Rygin A.V., Klimenov V.A., Martyshev N.V., Klopotov A.A., Strelkova I.L., Matrenin S.V., Batranin A.V., Deryusheva V.N.** Structural and mechanical properties of stainless steel formed under conditions of layer-by-layer fusion of a wire by an electron beam..... 111
- Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Larichkin A.Yu.** Enhanced assessment of technological factors for Ti-6Al-4V and Al-Cu-Mg strength properties..... 125
- Kalashnikova T.A., Beloborodov V.A., Osipovich K.S., Vorontsov A.V., Kalashnikov K.N.** Stir zone material flow patterns during friction stir welding of heavy gauge AA5056 workpieces and stability of its mechanical properties..... 140
- Krutskii Yu.L., Maksimovskii E.A., Petrov R.V., Netskina O.V., Ukhina A.V., Krutskaya T.M., Gudyma T.S.** Synthesis of titanium carbide and titanium diboride for metal processing and ceramics production..... 155

EDITORIAL MATERIALS

- Guidelines for Writing a Scientific Paper 167
- Abstract requirements 171
- Rules for authors 175

FOUNDERS MATERIALS

183



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ

Низами Юсубов^{a, *}, Хейран Аббасова^b

Азербайджанский технический университет, пр. Гусейн Джавида, 25, г. Баку, AZ 1073, Азербайджан

^a <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, nizami.yusubov@aztu.edu.az, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>, abbasova.heyran@aztu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 07 июля 2021
 Рецензирование: 06 августа 2021
 Принята к печати: 07 сентября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Многоцелевые станки с ЧПУ
 Точность обработки
 Полнофакторная точностная модель
 Поля рассеяния выполняемых размеров
 Матрица податливости
 Плоскопараллельная матрица податливости
 Угловая матрица податливости

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из главных причин того, что на современных многоцелевых станках с ЧПУ не используются возможности многоинструментной обработки, является отсутствие рекомендаций по проектированию в этом направлении и соответственно по схемам наладки. Исследование возможностей многоинструментной обработки на многоцелевых станках составляет предмет настоящей работы. **Цель работы:** рассмотрена задача разработки полнофакторных матричных моделей точности размеров и их чувствительности к процессу обработки для повышения эффективности точности обработки с использованием технологических возможностей многоинструментной обработки на современных многоцелевых станках с ЧПУ. Для этого разработаны полнофакторные матричные модели полей рассеяния размеров, выполняемых на многоинструментных двухсуппортных наладках, с учетом нередко встречающихся на практике случаев обработки деталей с габаритными размерами, резко отличающимися в разных направлениях, и значительном влиянии поворотов обрабатываемой заготовки на погрешность обработки, особенно в направлениях с резко отличающимися габаритными размерами. **Результаты работы.** Разработанные точностные модели дают возможность рассчитать не только плоскопараллельные перемещения технологической системы для двухсуппортной наладки, но и угловые перемещения вокруг базовых точек с учетом совокупного влияния множества факторов – комплексной характеристики подсистем технологической системы (плоскопараллельная матрица податливости и угловая матрица податливости), геометрию режущего инструмента, величины затупления инструмента, режимов резания и т. д. В результате на базе разработанных точностных моделей возможно получение нескольких путей управления многоинструментной обработкой, включая усовершенствование структуры многоинструментных наладок, расчет предельных значений режимов резания. На основе разработанных полнофакторных матричных моделей возникла возможность разработки рекомендаций по проектированию наладок и созданию автоматизированной системы проектирования многоинструментной обработки для группы современных многоцелевых токарных станков с ЧПУ. **Область применения результатов.** Полученные результаты могут использоваться при создании математического обеспечения проектирования операций в системах автоматизированного проектирования, предусмотренных для многоинструментной многосуппортной обработки, выполняемой на многоцелевых станках. **Выводы.** Разработанные модели и методология моделирования точности обработки дают возможность повышать точность и эффективность одновременной обработки, прогнозировать точность обработки в пределах заданных условий.

Для цитирования: Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 6–20. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.

Введение

Высокая стоимость современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на мировом рынке диктует необходимость ис-

пользования технологических возможностей этих станков на высоком уровне. Здесь большое значение имеет не только уменьшение времени обработки, но даже сведение до минимума вспомогательного времени. Одним из путей повышения производительности обработки на станках с ЧПУ является использование возможностей многоинструментной обработки на этих станках.

Многоинструментная обработка занимает в машиностроении важное место. Многоинстру-

*Адрес для переписки

Юсубов Низами Дамир, д.т.н., профессор
 Азербайджанский технический университет,
 пр. Гусейн Джавида, 25,
 AZ 1073, г. Баку, Азербайджан
 Тел.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

ментные наладки, обладающие большими потенциальными возможностями по концентрации переходов, дают возможность выполнять все формообразующие технологические превращения многономенклатурных деталей на одной токарно-автоматной операции до термической обработки, при том, что в большинстве случаев они выполняют всю обработку, начиная от заготовки и заканчивая готовой деталью. Номенклатура токарных станков, работающих с многоинструментными наладками, достаточно широка. Однако анализ уровня использования возможностей многоинструментной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ, проведенный на заводах, показал, что наладки с параллельной многоинструментной обработкой используются недостаточно [5, 7, 10–12]. По этой причине повышение эффективности использования технологических возможностей многоинструментной обработки на современных станках с ЧПУ является одной из проблем в машиностроении, ждущих своего решения.

Основной предпосылкой для решения возникшей проблемы является теория проектирования многоинструментной обработки с учетом возможностей современных станков с ЧПУ. Теория проектирования многоинструментной обработки на современных станках с ЧПУ построена на основе баланса взаимного влияния сил инструментов наладки с учетом возможностей движения инструментов по криволинейным траекториям, а также произвольного пространственного расположения инструментов в наладке. По этой причине в первую очередь важно иметь модели погрешностей обработки, учитывающие одновременное влияние всех составляющих сил резания всех инструментов наладки в многоинструментных наладках с пространственным расположением инструментов и упругие перемещения по всем координатным направлениям технологической системы. С учетом этого была создана матричная теория точности многоинструментной обработки [6]. Однако сформированные модели погрешности обработки учитывают только плоскопараллельные перемещения подсистем технологической системы по координатным осям декартовой системы координат XYZ [5, 6, 12]. Такой подход к моделированию процесса возникновения погрешностей обработки для деталей с габаритными размерами одного порядка по всем коор-

динатным направлениям допустим. На практике нередко встречаются случаи обработки деталей с габаритными размерами, резко отличающимися в разных направлениях, например, длинные валы (преобладают линейные размеры), диски и фланцы (преобладают диаметральные размеры). В этих случаях на погрешность обработки в значительной степени оказывают влияние повороты обрабатываемой заготовки, особенно в направлениях с резко различающимися габаритными размерами, и для этого возникает необходимость в создании полнофакторных моделей точности обработки, учитывающих также и угловые перемещения. Исследования других работ [1–4, 13–26] показывают, что в этой области работы носят частный характер и охватывают некоторые параметры. В этих работах часто встречаются исследования многоинструментной обработки, носящие экспериментальный характер. Математическое моделирование задачи и наряду с этим спецификация многоинструментной обработки, можно сказать, не встречаются полно ни в одном источнике. Самое важное, что эти модели не согласуются с общими законами механики упругодеформируемых систем, поэтому не могут использоваться для создания единой теории точности обработки, учитывающей возможные угловые перемещения подсистем технологической системы.

В промышленности применяются системы автоматизированного проектирования операций на современных многоцелевых станках с ЧПУ, однако и здесь не предусмотрены возможности повышения точности обработки и производительности многоинструментной обработки путем методики численного определения подач на основе моделирования упругих перемещений технологической системы с учетом ограничений по точности размеров и взаимного влияния одновременно работающих инструментов.

На современных многоцелевых станках с ЧПУ решение задачи наложения технологических переходов для двухсуппортных токарных станков в имеющихся в наличии автоматизированных системах программирования операций проводится в ручном режиме методом проб и ошибок. А это еще раз подтверждает отсутствие научно обоснованной методики по проектированию многоинструментной многосуппортной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ и показывает необходимость ее разработки.

Методика исследований

Точность выполняемых размеров является основным требованием при проектировании, наладке и реализации технологического процесса. Поэтому основной задачей параметризации проектируемого технологического процесса является расчет припусков и операционных размеров, составляющих единый раздел «Размерный анализ технологического процесса». Другой задачей этапа параметризации является расчет режимов резания [8]. Выполняемые размеры в многоинструментных наладках и промежуточные припуски напрямую связаны с параметрами режимов резания. По этой причине эти две задачи параметризации технологического процесса должны решаться одновременно [5, 6]. Основу матричной теории многоинструментной обработки составляют математические модели точности выполняемых размеров инструментами в многоинструментных наладках. Поэтому современный уровень математических моделей формирования погрешностей размеров в многоинструментных наладках представляет особый интерес.

Как установлено в науке технологии машиностроения, точность обработки определяется целым комплексом ряда случайных и закономерных факторов, их взаимным влиянием и взаимной связью: упругие перемещения технологической системы, размерный износ режущего инструмента, геометрическая неточность звеньев технологической системы, температурные деформации, погрешности расположения заготовок на станке и погрешности наладки их на выполняемый размер, рассеяние припусков заготовок и их физико-механических свойств и т. д. В значительной степени на точность обработки влияют и режимы резания [8, 9].

Количественным свойством точности обработки является погрешность обработки. Эта погрешность обработки выделяет степень несоответствия форм и размеров реальной детали заданной идеальной схеме в конструкции.

Все элементарные составляющие погрешности условно можно разделить на две группы [8].

1. Не зависящие от режимов резания или слабо от них зависящие элементарные составляющие погрешности (мало): погрешность размерного износа режущего инструмента ($\Delta_{и}$), геометрическая неточность звеньев технологической

системы ($\sum\Delta_{\phi}$); погрешности температурных деформаций ($\sum\Delta T$); погрешности установки заготовок на станке (ϵ), погрешность наладки заготовки на выполняемый размер ($\Delta_{н}$).

2. Элементарная составляющая погрешность, полностью определяемая режимами резания: погрешность упругих перемещений технологической системы ($\Delta_{у}$).

Погрешности первой группы не представляют никакого интереса во время разработки имитационных моделей, определенных для проектирования технологического процесса. Эти составляющие участвуют как постоянные (константы) в имитационных моделях. Их значения берутся из обширной справочной литературы.

Во время моделирования точности обработки в результате упругих перемещений технологической системы от влияния сил резания особое место занимает элементарная погрешность $\Delta_{у}$, возникающая в технологической системе. Ее значение определяется режимами резания, особенностями технологической системы. По этой причине элементарная погрешность $\Delta_{у}$ выступает здесь как основной управляемый объект и требуется ее математическое выражение.

Из-за искажения выполняемого размера на практике более востребована другая характеристика точности обработки – значение поля рассеяния выполняемого размера. По причине взаимного действия силы для многоинструментных наладок установлено два граничных случая [5, 6]: опозитный и сопозитный. В опозитной наладке все составляющие силы резания одного суппорта направлены против соответствующих составляющих другого суппорта. Такие наладки обычны для токарно-револьверных автоматов с кулачковым управлением и токарных многошпиндельных автоматов, а в сопозитных наладках все соответствующие составляющие силы резания обоих суппортов направлены в одну сторону. На современной группе токарных станков с ЧПУ обе наладки используются в равной степени.

На основании вышесказанного можно отметить, что для разработки теории численного проектирования многоинструментных наладок необходимы комплексные модели искажения выполняемых размеров и их полей рассеяния. Эти модели должны учитывать структуру многоинструментных наладок – различного типа резцы продольного или поперечного суппорта,



одновременную работу продольного и поперечного суппорта.

Механизм формирования поля рассеяния в двухсуппортных опозитных наладках по сравнению с односуппортной обработкой чрезвычайно сложен [6]. Рассеяние прочностных свойств материала заготовок и жесткости технологической системы определяет масштаб интервала рассеяния искажения размеров w_1 и w_2 , а влияние изменения припуска на суппортах неоднозначно. По причине того что на продольном и поперечном суппорте силы резания направлены друг против друга, изменение припусков Δt_1 и Δt_2

может привести к изменению баланса сил. В результате этого интервалы рассеяния выполняемых размеров бывают трех различных порядков [6, 27]. Объединив все 3 варианта расположения полей рассеяния, возможно сформировать единую модель поля рассеяния с учетом не только плоскопараллельного перемещения технологических подсистем выполняемых размеров на продольном суппорте двухсуппортных опозитных наладок, но и угловые перемещения вокруг базовых точек. Далее дана полнофакторная матричная модель выполняемого диаметрального размера на продольном суппорте:

$$\begin{aligned}
 & \omega \left[e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] + \omega \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} + \right. \\
 & \left. + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] \\
 & \text{при } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \geq \\
 & \geq \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} + \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2}, \\
 & \text{где } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} > 0; \\
 & \left(1 + \frac{\omega}{2} \right) \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] + \left(1 + \frac{\omega}{2} \right) \left[\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + \right. \\
 & \left. + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] \\
 \Delta w_1 = & \text{при } - \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} - \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} < \\
 & < e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} < \\
 & \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} + \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2}; \\
 & - \omega \left[e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] - \omega \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} + \right. \\
 & \left. + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] \\
 & \text{при } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \leq \\
 & \leq - \frac{e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2} - \frac{\left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2}}{2}, \\
 & \text{где } e_{01} t_1 \overline{p_t^1} - e_0 t_2 \overline{p_t^2} + \left(- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} \right) + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} < 0;
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\overline{p_t^1} = \begin{pmatrix} C_{P_x^1} t_1^{x_{P_x^1}-1} S_1^{y_{P_x^1}} v_1^{z_{P_x^1}} \\ C_{P_y^1} t_1^{x_{P_y^1}-1} S_1^{y_{P_y^1}} v_1^{z_{P_y^1}} \\ C_{P_z^1} t_1^{x_{P_z^1}-1} S_1^{y_{P_z^1}} v_1^{z_{P_z^1}} \end{pmatrix}; \quad \overline{p_t^2} = \begin{pmatrix} C_{P_y^2} t_2^{x_{P_y^2}-1} S_2^{y_{P_y^2}} v_2^{z_{P_y^2}} \\ C_{P_x^2} t_2^{x_{P_x^2}-1} S_2^{y_{P_x^2}} v_2^{z_{P_x^2}} \\ C_{P_z^2} t_2^{x_{P_z^2}-1} S_2^{y_{P_z^2}} v_2^{z_{P_z^2}} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\overline{p_{\Delta t}^1} = \begin{pmatrix} x_{P_x^1} t_1^{x_{P_x^1}-1} C_{P_x^1} S_1^{y_{P_x^1}} v_1^{z_{P_x^1}} \\ x_{P_y^1} t_1^{x_{P_y^1}-1} C_{P_y^1} S_1^{y_{P_y^1}} v_1^{z_{P_y^1}} \\ x_{P_z^1} t_1^{x_{P_z^1}-1} C_{P_z^1} S_1^{y_{P_z^1}} v_1^{z_{P_z^1}} \end{pmatrix}; \quad \overline{p_{\Delta t}^2} = \begin{pmatrix} x_{P_y^2} C_{P_y^2} t_2^{x_{P_y^2}-1} S_2^{y_{P_y^2}} v_2^{z_{P_y^2}} \\ x_{P_x^2} C_{P_x^2} t_2^{x_{P_x^2}-1} S_2^{y_{P_x^2}} v_2^{z_{P_x^2}} \\ x_{P_z^2} C_{P_z^2} t_2^{x_{P_z^2}-1} S_2^{y_{P_z^2}} v_2^{z_{P_z^2}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Значение силы резания рассчитывается по известной формуле $p_i = c_i t^{x_i} s^{y_i} v^{z_i}$, $i = x; y; z$ в зависимости от параметра t [11].

Модель поля рассеяния выполняемых размеров на поперечном суппорте в опозитной наладке аналогична. В сопозитной наладке нет взаимного влияния сил резания. Поэтому интервал рассеяния искажения обладает единым

положительным положением. Максимум этого интервала бывает при больших припусках на обоих суппортах, максимальной прочности заготовки и минимальной податливости технологической системы, а минимум получается при обратном положении. В результате для поля рассеяния выполняемого размера на продольном суппорте в сопозитной наладке соответственно получаем:

$$\begin{aligned} \Delta w_1 = & \omega \left[e_{01} t_1 \overline{p_t^1} + e_{02} t_2 \overline{p_t^2} \right] + \left[e_{01} \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} + e_{02} \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right] + \\ & + \omega \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) t_1 \overline{p_t^1} - a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 t_2 \overline{p_t^2} \right] + \\ & + \left[- \left(a_{O_1}^1 \xi_1 a_{O_1}^1 + a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \right) \Delta t_1 \overline{p_{\Delta t}^1} - a_{O_0}^0 \xi_0 a_{O_0}^0 \Delta t_2 \overline{p_{\Delta t}^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

В сопозитной наладке модель поля рассеяния размера на поперечном суппорте аналогична.

Большая часть реальных многоинструментных наладок не обладает однородностью по направлению сил резания. По этой причине не имеется единой расчетной схемы поля рассеяния для неоднородных наладок по направлению. Расчетная схема поля рассеяния определяется отдельно для каждого координатного направления. Так, одна наладка может быть опозитной в направлении одного выполняемого размера, сопозитной – в направлении другого выполняе-

мого размера. Если наладка в рассматриваемом направлении опозитна, то применяется часть разработанных моделей (например, модель (1) для продольного суппорта) в направлении рассматриваемого размера, а для сопозитных наладок применяется часть разработанных моделей в направлении рассматриваемого размера (например, модель (4) для продольного суппорта).

Во время двухинструментной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ в результате разработки полнофакторных матричных матема-

тических моделей погрешностей выполняемых размеров с использованием соответствующих входных параметров для решения различных задач практического значения некоторые параметры необходимо определять экспериментально. С определением комплексной характеристики податливости технологической системы для каждой подсистемы, состоящей из двух матричных комплексов – упругости подсистем по координатным осям и координатной матрицы податливости e , характеризующей их взаимное влияние, и, показав сопротивление подсистем поворотам их вокруг координатных осей и угловую матрицу упругости ξ , характеризующую их взаимное влияние, определяем комплексную характеристику податливости подсистем. С помощью этой характеристики возможно рассчитать полное искажение выполняемых размеров для заданной наладки [27].

Во время оценки адекватности теоретической полнофакторной модели искажения размеров после установки заготовки для нивелирования погрешности расположения и формы заготовки предварительно обрабатываем ее на определенный размер, а именно 75 мм. Это, в свою очередь, обеспечивает равное распределение припуска при последующей обработке. Первичную обработку выполняем с небольшой подачей s и припуском t . После этого, измерив ее размер микрометром, отмечаем результат. Для проверки адекватности теоретических зависимостей были сравнены теоретические и экспериментальные значения точности выполняемых размеров. Анализ показал, что эти значения расположены достаточно близко (для указанных в таблице и других случаев разница не превышает 10 %).

Все опыты проведены с оценкой среднего значения с учетом распределения результатов и их соответствия теоретической модели по критерию Стьюдента. Необходимое количество повторов опытов определено по критерию Романовского [28].

Необходимо отметить, что по причине того, что глубина резания t , ее изменение Δt , а также свойство неустойчивости ω технологической системы являются причиной возникновения поля рассеяния выполняемого размера, во время проверки разработанных моделей на эти факторы обращено особое внимание. Другие факторы в рассматриваемых моделях в зависимости от ре-

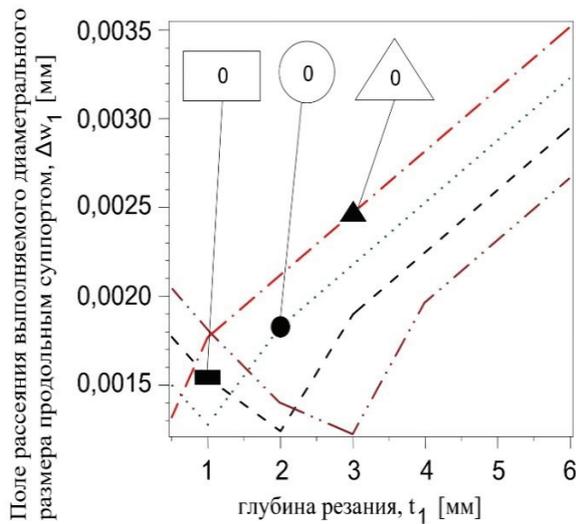
жимов участвуют в моделях посредством силы резания.

Разработанная многофакторная матричная модель с учетом не только плоскопараллельных перемещений технологических подсистем, но и угловых перемещений вокруг базовых точек составляет базу для модели искажения выполняемых размеров в двухсуппортной наладке.

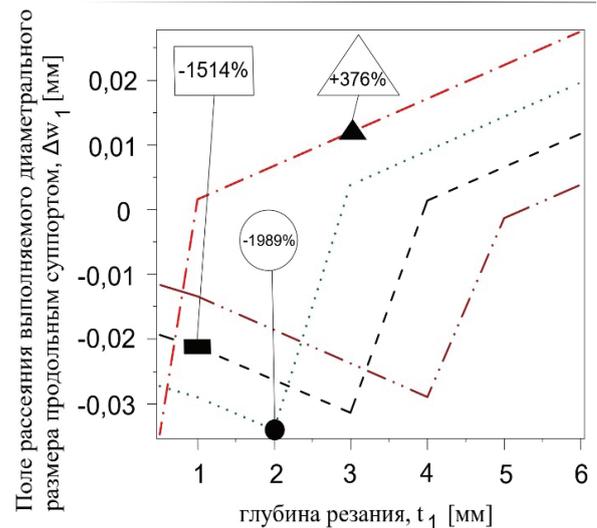
Исследование математических моделей формирования погрешностей выполняемых размеров дает возможность выполнять расчеты точности для различных условий обработки. Эти модели учитывают совместное влияние совокупности факторов – характеристику жесткости подсистем технологической системы, геометрию режущих инструментов, значение притупления инструмента, режимы резания и т. д.

Для проверки работоспособности моделей были рассчитаны варианты с различными исходными данными, определяющими действие формулы, т. е. для различных вариантов выполнено исследование точности обработки. Работоспособность точностных моделей многоинструментной двухсуппортной обработки проверена с помощью влияния технологических факторов и конструктивных размеров наладки на значение поля рассеяния выполняемого диаметрального размера продольным суппортом при многоинструментной двухсуппортной обработке. В качестве примера на рис. 1 показано влияние выполняемого диаметрального размера на продольном суппорте при многоинструментной двухсуппортной обработке на значение поля рассеяния при его значениях $t_1 = 1 \dots 6$ мм, $t_2 = 1 \dots 4$ мм. Базовый вариант: двухсуппортная обработка – продольный и поперечный суппорт, режущая пластина – *CNMG 120408 P04 4225 CoroKey*, заготовка-сталь 45, качество точности – ИТР₁12, ИТР₂12, размеры заготовки $D = L = 74,9$ мм; скорость резания $V_1 = V_2 = 200$ м/мин; подача $s_1 = s_2 = 0,24$ мм/об; $\omega \approx 0,2$; координаты связующих векторов точек O_0 и O_1 относительно базовых точек приложения сил $\overline{P^1}$ и $\overline{P^2}$: $X_0 = 74,9$ мм, $Y_0 = 37,45$ мм, $X_1 = 136$ мм, $Y_1 = 130$ мм.

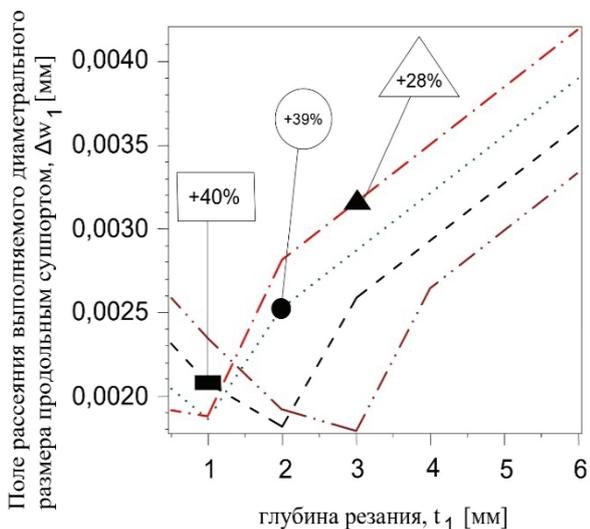
На графиках выделены 3 опорные (ссылки) точки: ● – $t_1 = 2$ мм, $t_2 = 2$ мм; ▲ – $t_1 = 3$ мм, $t_2 = 1$ мм; ■ – $t_1 = 1$ мм, $t_2 = 3$ мм. В базовом варианте (рис. 1, а) для каждой опорной точки показано, на какой ветви графика она находится, а в варианте (рис. 1, б) на соответствующей фор-



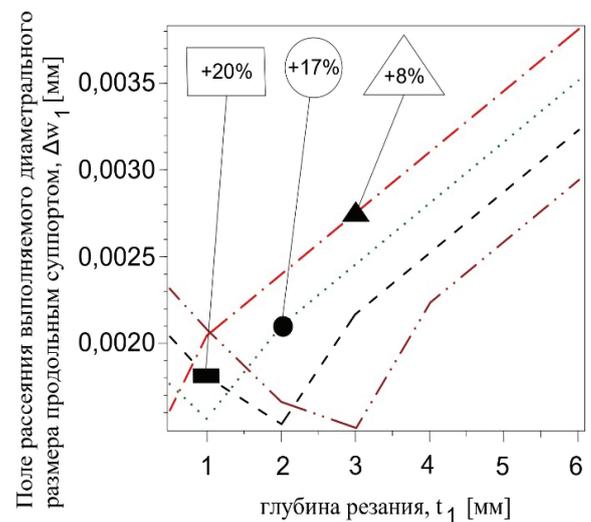
а



б



в



з

- · - · - $t_2 = 1 \text{ мм}$, · · · · · $t_2 = 2 \text{ мм}$, - - - - - $t_2 = 3 \text{ мм}$, - · - · - $t_2 = 4 \text{ мм}$

Рис. 1. Влияние глубины резания на продольном и поперечном суппорте на значение поля рассеяния выполняемого диаметрального размера продольным суппортом при многоинструментной двухсуппортной обработке:

а – базовой вариант; б – $X_0 = 898,8 \text{ мм}$; в – ИТР₁13; з – ИТР₂13

Fig. 1. Influence of cutting depths in longitudinal and cross carriages on the value of scattering field of diametrical dimension performed by longitudinal carriage in multi-tool two-carriage processing:

а – base variant; б – $X_0 = 898.8 \text{ мм}$; в – ИТР₁13; з – ИТР₂13

ме этикетках (ярлыках) показано скольжение этих точек относительно базового варианта. Из рис. 1 видно, что, характер кривых Δw полностью совпадает с внедренным мнением для опозитных и сопозитных наладок, т. е. у них имеется 3 ветви (рукава).

На рис. 1, б показано влияние на погрешность формируемого диаметрального размера на продольном суппорте во время увеличения

в 12 раз по сравнению с базовым вариантом отношения длины обрабатываемой детали к диаметру. Отсюда видно, что погрешность формируемого в это время диаметрального размера на продольном суппорте изменяется по базовым точкам от уменьшения -1989% до увеличения $+376 \%$. Проведенные исследования показали, что при увеличении отношения длины обрабатываемой детали к диаметру по сравнению с

базовым вариантом в 2, 3 раза или в 5, 10 раз погрешность формируемого диаметрального размера на продольном суппорте изменяется соответственно по базовым точкам от уменьшения -27% до увеличения 4% , от уменьшения -73% до увеличения 16% , от уменьшения -220% до увеличения 56% , от уменьшения -1040% до увеличения 256% . Такое изменение погрешности объясняется возможными угловыми перемещениями, связанными с поворотными моментами технологической системы. Во время проведения обработки с помощью проходного резца, расположенного на поперечном суппорте, снижение точности заготовки на один квалитет повышает погрешность выполняемого диаметрального размера (по сравнению с базовыми точками) проходным резцом, расположенным на продольном суппорте на $8...20\%$.

В то же время понижение точности заготовки на один квалитет для выполняемого диаметрального размера проходным резцом, расположенным на продольном суппорте, практически влияет на $28...40\%$ на погрешность диаметра.

Размер револьверной головки станка и координаты инструмента относительно центра револьверной головки – также важные факторы. При возрастании этих координат относительно базового варианта в 2 и 1,5 раза было замечено изменение погрешности формируемого диаметрального размера соответственно по базовым точкам от убывания на 60% к возрастанию на 44% и от убывания на 20% к возрастанию на 17% .

На рис. 2 показано влияние технологических и конструктивных факторов на плоскопараллельные перемещения и угловые перемещения вокруг базовых точек технологической системы при значении диаметрального размера, выполняемого на продольном суппорте при многоинструментной двухсуппортной обработке, равного полю рассеяния. Базовый вариант такой же, как на рис. 1, а также показаны изменения для другого варианта. Здесь, приняв двукратное значение отношения длины обрабатываемой детали к ее диаметру ($X_0 = 149,8$ мм, $Y_0 = 74,9$ мм, $X_0 / Y_0 = 2$), как базовый вариант (рис. 2, а), показано процентное количественное выражение

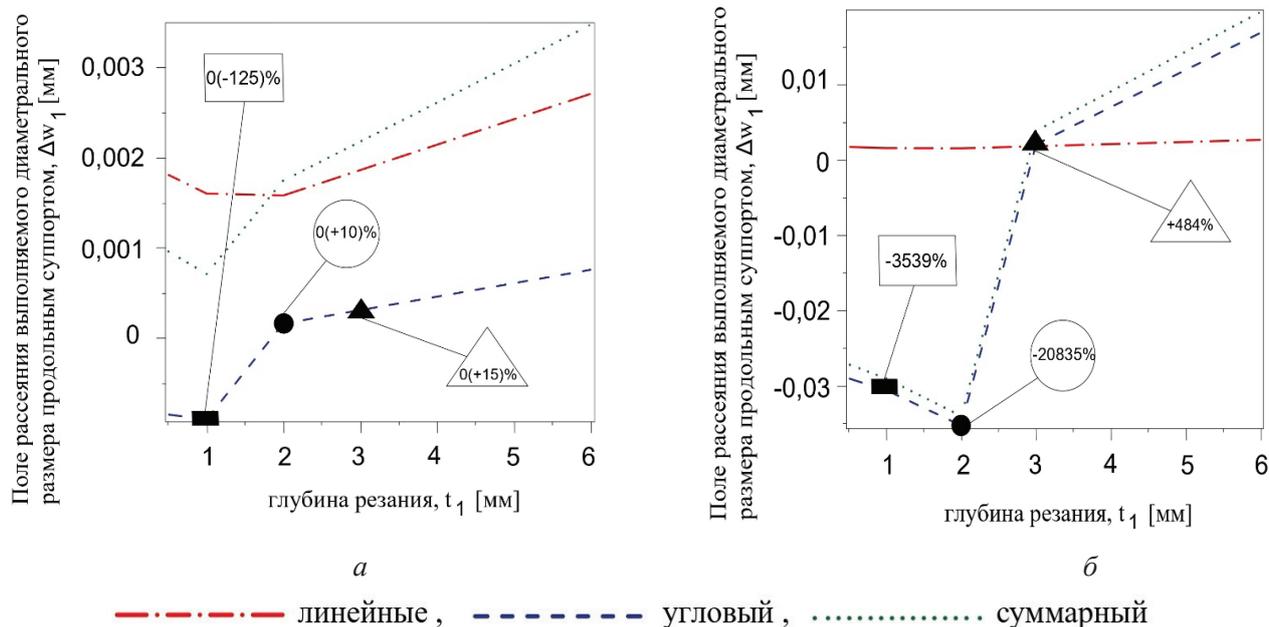


Рис. 2. Влияние технологических и конструктивных факторов угловых перемещений вокруг базовых точек и плоскопараллельных перемещений технологической системы при значении выполняемого диаметрального размера на продольном суппорте при многоинструментной двухсуппортной обработке, равного полю рассеяния:

$$a - X_0 = 149,8 \text{ мм (базовой вариант); } b - X_0 = 898,8 \text{ мм}$$

Fig. 2. Influence of technological and design factors of angular displacements around base points and plane-parallel displacements of the technological system at the value of the diametric size being performed on the longitudinal support with multi-tool two-carriage processing equal to the scattering field:

$$a - X_0 = 149.8 \text{ mm (base variant); } b - X_0 = 898.8 \text{ mm}$$

плоскопараллельных перемещений и угловых перемещений вокруг базовых точек при значениях формируемого на продольном суппорте диаметра, равного полю рассеяния во время увеличения длины детали в 6 раз. Здесь также на графиках выделены 3 опорные точки (ссылки): ● – $t_1 = 2$ мм, $t_2 = 2$ мм; ▲ – $t_1 = 3$ мм, $t_2 = 2$ мм; ■ – $t_1 = 1$ мм, $t_2 = 2$ мм. В базовом варианте (рис. 2, а) для каждой опорной точки показано, на какой из ветвей графика она находится. Если на рис. 2, а обратим внимание на базовый вариант, то увидим, что для этого варианта процентное количественное выражение угловых перемещений вокруг базовых точек в опорных точках составляет: для ● – 10 % (соответственно линейные перемещения 90 %), для ▲ – 15 % (соответственно линейные перемещения 85 %) и для ■ – 125 % (соответственно линейные перемещения 225 %).

Поскольку для случая ■ линейные и угловые перемещения происходят в разных направлениях, то в их суммарном значении их количественное выражение в процентах получается обратным друг другу. В этом случае отношение линейных перемещений к угловым составляет 0,56. Однако это отношение в других вариантах изменяется.

Исследования показывают, что при возрастании отношения длины обрабатываемой детали к ее диаметру в 1,5, 2,5 раза, а также в 5 раз, значение поля рассеяния выполняемого диаметра на продольном суппорте изменяется соответственно по базовым точкам от уменьшения –312 % до возрастания 12,5 %, от уменьшения –684 % до возрастания 67 %, от уменьшения –14424 % до возрастания 384 %. Здесь такое изменение погрешности объясняется также возможными угловыми перемещениями, связанными с поворотными моментами технологической системы. Возрастание отрицательных процентов объясняется возрастанием угловых перемещений в суммарном перемещении.

На рис. 1 показано влияние глубины резания на погрешность обработки, однако во время проектирования более выгодны для управления другие параметры – подачи на продольном и поперечном суппорте. Влияние этих факторов показано на рис. 3.

Кроме того, на рис. 3 показано влияние подачи и других технологических факторов на значе-

ние поля рассеяния выполняемого диаметра на продольном суппорте во время многоинструментной двухсуппортной обработки. Здесь три опорные точки разделены так: ● – $s_1 = 0,2$ мм/об, $s_2 = 0,2$ мм/об; ▲ – $s_1 = 0,2$ мм/об, $s_2 = 0,4$ мм/об; ■ – $s_1 = 0,2$ мм/об, $s_2 = 0,1$ мм/об. Базовый вариант такой же, как мы видим на рис. 1, а также показано изменение и для другого варианта. В базовом варианте (рис. 3, а) показано, на каких ветвях графика расположены эти точки. Знаками соответствующей формы отображено, какую выгоду дает изменение условий обработки для каждого варианта. На рис. 3, б показан вариант, при котором многоинструментная двухсуппортная обработка при определенных значениях может давать более низкие значения погрешности по сравнению с одноинструментной обработкой. Установлено, что, если менять подачи во время многоинструментной двухсуппортной обработки по сравнению с одноинструментной обработкой, то возможно обеспечить более высокую точность. При управлении подачами и изменении других условий обработки возможно значительно понизить или повысить погрешность обработки: для точки ■ – от 42 до +250 %, для точки ● – от 2014 до +38 %, для точки ▲ – от 2356 до +1602 %.

Таким образом, еще раз убеждаемся в том, что подачи суппортов во время двухсуппортной обработки являются эффективным инструментом управления. Установленная работоспособность разработанных моделей и общее количество учтенных факторов в результате дают возможность использовать их как основы модели управления многоинструментной двухсуппортной обработкой.

Результаты и их обсуждение

Предлагаются полнофакторные модели полей рассеяния выполняемых размеров во время многоинструментной обработки на многоцелевых станках с ЧПУ. Эти модели учитывают упругость технологической системы по всем 6 степеням свободы и таким образом дают возможность учесть как плоскопараллельные, так и угловые перемещения вокруг базовых точек технологической системы.

Для проверки работоспособности моделей рассчитаны варианты с различными исходными

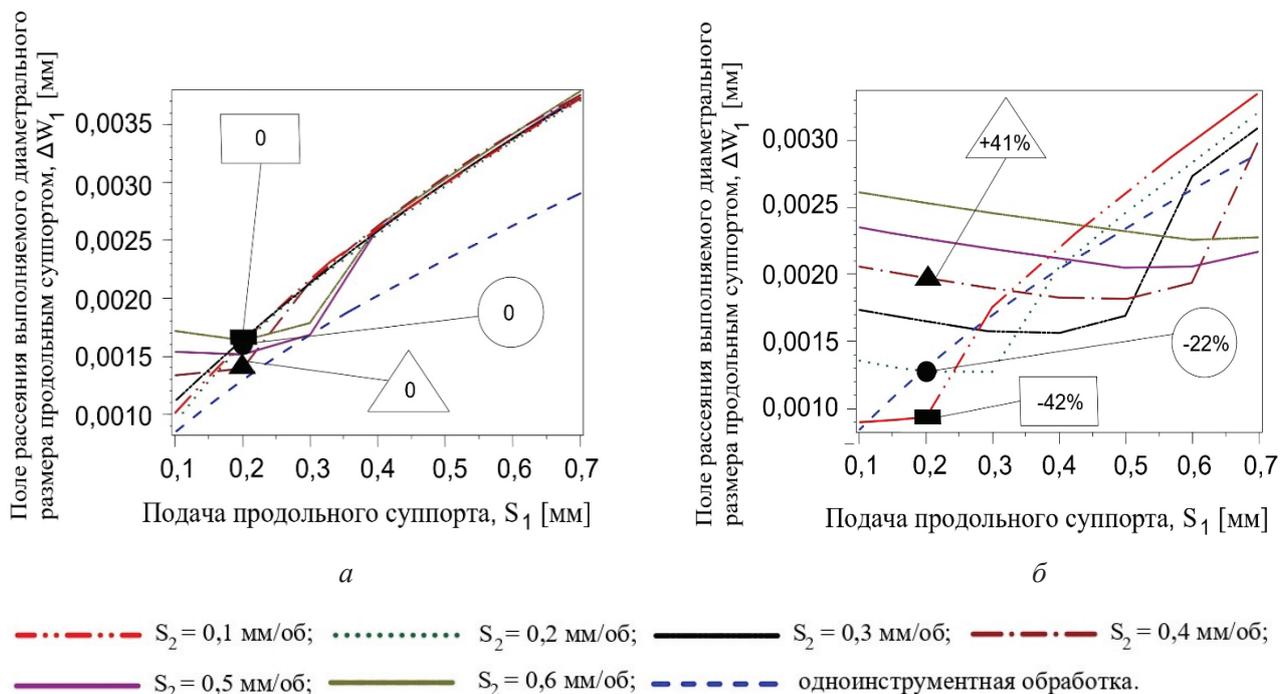


Рис. 3. Влияние подачи и других технологических факторов на значение поля рассеяния выполняемого диаметрального размера продольным суппортом при многоинструментной двухсуппортной обработке. Базовый вариант глубины резания $t_1 = t_2 = 2$ мм:

a – базовой вариант; b – $t_2 = 4$ мм

Fig. 3. Influence of feed and other technological factors on value of scattering field of diametrical dimension performed by longitudinal carriage in multi-tool double-carriage processing. Base variant cutting depths $t_1 = t_2 = 2$ mm:

a – base variant; b – $t_2 = 4$ mm

данными, определяющими влияние формулы, т. е. для различных вариантов выполнены теоретические исследования точности обработки. Во время теоретических исследований в моделях искажения и рассеяния выполняемых размеров в двухсуппортной наладке по отдельности рассмотрены в зависимости от технологических параметров как плоскопараллельные, так и угловые перемещения вокруг базовых точек технологических подсистем. Влияние в значительной степени на увеличение угловых перемещений с увеличением длины обрабатываемой детали наглядно отображено при помощи разработанных моделей. Этим показана необходимость учета влияния угловых перемещений при обработке нежестких деталей.

Разработанные теоретические полнофакторные модели искажения размеров для двухсуппортных наладок отображают влияние основных технологических и конструктивных факторов, и по этой причине они могут быть использованы

при проектировании операций по учету точностных требований.

Установленная работоспособность полнофакторных матричных моделей и учтенная сфера их действия в результате дают возможность использовать их как основы моделей управления многоинструментной двухсуппортной обработкой. Исследование математических моделей формирования погрешностей выполняемых размеров позволяет выполнить расчет точности для различных условий обработки. Эти модели учитывают совместное влияние совокупности факторов – характеристику жесткости подсистем технологической системы, геометрию режущего инструмента, значение притупления инструмента, режимы резания и т. д.

На базе разработанных моделей создается возможность определения уровня влияния комплекса технологических факторов на точность обработки – структуры многоинструментных наладок, деформационные свойства подсистем

технологической системы, режимов резания. Разработанные модели дают возможность прогнозировать точность обработки для заданных условий (структура наладки, свойства технологической системы, условия обработки) и создают методологическую базу для систем автоматизированного проектирования многоинструментной токарной обработки.

Разработанные полнофакторные матричные модели полей рассеяния выполняемых размеров в многоинструментных двухсуппортных наладках позволяют рассчитать значения погрешности каждого выполняемого размера на стадии проектирования для различных вариантов наладок и тем самым создают условия для обоснования наилучшего варианта. Для использования данной модели в реальном технологическом процессе необходимо переходить или к возможно задаваемому или возможно измеримому значению параметра реальной детали или заготовки. Например, Δw_1 – здесь под действием силы резания рассчитывает составляющее поле рассеяния, обусловленное упругими деформациями технологической системы, в то же время возможно определить только полное поле рассеяния. В модели учитывается изменение глубины резания, однако реально можем оценить первичную погрешность заготовки.

Наличие фактической комплексной матричной характеристики податливости для реального станка дает возможность оценить практическую применимость разработанных матричных моделей точности обработки.

Разработанные модели позволяют определять максимальные допустимые значения режимов резания. Тем самым при заданной точности может быть обеспечена самая высокая производительность во время обработки.

Разработанные модели перемещений во время решения задачи проектирования обработки на многоцелевых станках с ЧПУ возможно трансформировать в модели управления. По причине того, что разработанные модели учитывают координатные и угловые перемещения, можно работать по требованиям значений поля рассеяния выполняемых размеров и погрешности формы управляющих моделей.

Список литературы

1. *Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y.* A knowledge-based intelligent decision system for production planning // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 89, iss. 5–8. – P. 1717–1729. – DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.
2. Increasing of lathe equipment efficiency by application of gang-tool holder / *M. Gasanov, A. Kotliar, Y. Basova, M. Ivanova, O. Panamariova* // *Advances in Manufacturing II*. – Cham: Springer, 2019. – Vol. 4. – P. 133–144. – DOI: 10.1007/978-3-030-16943-5_12.
3. A methodology of improvement of manufacturing productivity through increasing operational efficiency of the production process / *J. Trojanowska, A. Kolinski, D. Galusik, M.L.R. Varela, J. Machado* // *Advances in Manufacturing*. – Cham: Springer, 2019. – P. 23–32. – DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6_3.
4. Optimization of multi-tool machining processes with simultaneous action / *R. Usubamatov, Z.M. Zain, T.C. Sin, S. Kapayeva* // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 82. – P. 1227–1239. – DOI: 10.1007/s00170-015-6920-x.
5. *Yusubov N.D.* Matrix models of the accuracy in multitool two-support setup // *Russian Engineering Research*. – 2009. – Vol. 29. – P. 268–271. – DOI: 10.3103/S1068798X09030125.
6. *Кошин А.А., Юсубов Н.Д.* Элементы матричной теории точности многоинструментной обработки в пространственных наладках // *Вестник машиностроения*. – 2013. – № 9. – P. 13–17.
7. *Hirsch A.* *Werkzeugmaschinen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. – 3. Aufl. – Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. – 441 p. – ISBN 978-3-658-14249-0. – DOI: 10.1007/978-3-658-14249-0.
8. *Антимонов А.М.* Основы технологии машиностроения. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 176 с. – ISBN 978-5-7996-2132-2.
9. *Багров Б.М., Козлов А.М.* Многоцелевые станки. – Липецк: Липец. гос. техн. ун-т, 2004. – 193 с. – ISBN 5-88247-183-4.
10. *Кошин А.А.* Обработка на токарных станках: наладка, режимы резания: справочник. – Челябинск: Сити-Принт, 2012. – 744 с.
11. *Yusubov N.D., Abbasova H.M., Khankishiyev I.A.* Entwicklung einer Projektierungstheorie für die Mehrwerkzeuggestaltung mit den Möglichkeiten der modernen CNC-Werkzeugmaschinen // *Forschung im Ingenieurwesen*. – 2021. – Vol. 85. – P. 661–678. – DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.
12. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces / *C. Brecher, A. Epple, S. Neues, M. Fey* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Vol. 95. – P. 13–19. – DOI: 10.1016/j.ijmactools.2015.05.003.



13. *Budak E., Ozturk E.* Dynamics and stability of parallel turning operations // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 60, iss. 1. – P. 383–386. – DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.028.

14. *Azvar M., Budak E.* Multi-dimensional chatter stability for enhanced productivity in different parallel turning strategies // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2017. – Vol. 123. – P. 116–128. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.08.005.

15. *Ozturk E., Comak A., Budak E.* Tuning of tool dynamics for increased stability of parallel (simultaneous) turning processes // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 360. – P. 17–30. – DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.009.

16. A new mathematical method of modeling parts in virtual CNC lathing and its application on accurate tool path generation / *Z. Chang, Z.C. Chen, N. Wan, H. Sun* // *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 95. – P. 243–256. – DOI: 10.1007/s00170-017-1202-4.

17. Multi-cutter turning process stability analysis / *A.M. Gousov, M.A. Gousov, D.D. Tung, G. Panovka* // *Vibroengineering PROCEDIA*. – 2018. – Vol. 17. – P. 124–129. – DOI: 10.21595/vp.2018.19800.

18. Effect of distance between two cutting tools over cutting forces and heat generation in multi-tool turning process / *R. Kalidasan, M. Yatin, D.K. Sarma, S. Senthilvelan* // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 592–594. – P. 211–215. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.211.

19. Influence of cutting speed and offset distance over cutting tool vibration in multi-tool turning process / *R. Kalidasan, V. Ramanuj, D.K. Sarma, S. Senthilvelan* // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 984–985. – P. 100–105. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.984-985.100.

20. Double tool turning: machining accuracy, cutting tool wear and chip-morphology / *R. Kalidasan, S. Senthilvelan, U.S. Dixit, V. Jaiswal* // *International Journal of Precision Technology*. – 2016. – Vol. 6, N 2. – P. 142–158. – DOI: 10.1504/IJPTECH.2016.078189.

21. *Kalidasan R.* Experimental Investigations on Double Tool Turning Process: a thesis of Dr. of philosophy. – Guwahati, India, 2017. – 133 p.

22. Preliminary experimental investigation on multi-tool turning process / *R. Kalidasan, M. Yatin, S. Senthilvelan, D.K. Sarma* // *Proceedings of the 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference AIMTDR*. – Guwahati, 2014. – P. 50-1–50-5.

23. An experimental study of cutting forces and temperature in multi-tool turning of grey cast iron / *R. Kalidasan, M. Yatin, D.K. Sarma, S. Senthilvelan, U.S. Dixit* // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2016. – Vol. 18, N 5–6. – P. 540–551. – DOI: 10.1504/IJMMM.2016.078992.

24. *Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y.* A knowledge-based intelligent decision system for production planning // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 89, iss. 5. – P. 1717–1729. – DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.

25. Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm / *N. Baskar, P. Asokan, R. Saravanan, G. Prabhakaran* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – Vol. 174, iss. 1–3. – P. 239–249. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.032.

26. *Орукари Б.Дж.* Технологическое обеспечение автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Минск, 2018. – 22 с.

27. *Yusubov N., Abbasova H.* Models for machining accuracy in multi-tool adjustment // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 17, N 3. – P. 8067–8085. – DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.

28. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 912 с. – ISBN 5-94275-013-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines

Nizami Yusubov^{a, *}, Heyran Abbasova^b

Department of Machine Building, Azerbaijan Technical University, 25 H. Cavid avenue, Baku, AZ1073, Azerbaijan

^a <https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, nizami.yusubov@aztu.edu.az, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>, abbasova.heyran@aztu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 July 2021

Revised: 06 August 2021

Accepted: 07 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Multi-purpose CNC machines

Machining accuracy

Full-factor accuracy model

Scattering fields of performed dimensions

Matrix of compliance

Plane-parallel matrix of compliance

Angle matrix of compliance

ABSTRACT

Introduction. One of the main reasons that modern multi-purpose CNC machines do not use the capabilities of multi-tool processing is the lack of recommendations for design in this direction and, accordingly, for adjustment schemes. The study of the possibilities of multi-tool processing on multi-purpose machines is the subject of the work. **The purpose of research:** The problem of developing full-factor matrix models of dimensional accuracy and its sensitivity to the machining process is considered to increase the machining efficiency while ensuring machining accuracy using the technological capabilities of multi-tool machining on modern multi-purpose CNC machines. For this purpose, full-factor matrix models of the size scattering fields performed on multi-tool double-carriage adjustments have been developed, taking into account the cases of processing parts with dimensions that differ sharply in different directions, which are often encountered in practice, and in this case, the significant influence of the turns of the workpiece on the processing error, especially in directions with sharply different overall dimensions. **Results of research:** The developed accuracy models make it possible to calculate not only plane-parallel displacements of the technological system for double-carriage adjustments, but also angular displacements around base points, take into account the combined effect of many factors – a complex characteristic of the subsystems of the technological system (plane-parallel matrix of compliance and angular matrix of compliance), the geometry of the cutting tool, the amount of bluntness of the tool, cutting conditions, etc. As a result, based on the developed accuracy models, it is possible to obtain several ways to control multi-tool machining, including improving the structure of multi-tool adjustments, calculating the limiting values of cutting conditions. Based on the developed full-factor matrix models, it became possible to develop recommendations for the design of adjustments and the creation of an automated design system for multi-tool machining for a group of modern multi-purpose CNC lathes. **Scope of the results:** The results obtained can be used to create mathematical support for the design of operations in CAD-systems provided for multi-tool multi-carriage machining performed on multi-purpose machines. **Conclusions:** The developed models and methodology for simulating the machining accuracy make it possible to increase the accuracy and efficiency of simultaneous machining, to predict the machining accuracy within the specified conditions.

For citation: Yusubov N.D., Abbasova H.M. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20. (In Russian).

References

1. Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y. A knowledge-based intelligent decision system for production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, iss. 5–8, pp. 1717–1729. DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.
2. Gasanov M., Kotliar A., Basova Y., Ivanova M., Panamariova O. Increasing of lathe equipment efficiency by application of gang-tool holder. *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer, 2019, vol. 4, pp. 133–144. DOI: 10.1007/978-3-030-16943-5_12.

* Corresponding author

Yusubov Nizami D., D.Sc. (Engineering), Professor

Azerbaijan Technical University,

25 H. Javid avenue,

AZ 1073, Baku, Azerbaijan

Tel.: +994 (55) 324 50 12, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az

3. Trojanowska J., Kolinski A., Galusik D., Varela M.L.R., Machado J. A methodology of improvement of manufacturing productivity through increasing operational efficiency of the production process. *Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Springer, 2019, pp. 23–32. DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6_3.
4. Usubamatov R., Zain Z.M., Sin T.C., Kapaeva S. Optimization of multi-tool machining processes with simultaneous action. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1227–1239. DOI: 10.1007/s00170-015-6920-x.
5. Yusubov N.D. Matrix models of the accuracy in multitool two-support setup. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, pp. 268–271. DOI: 10.3103/S1068798X09030125.
6. Koshin A.A., Yusubov N.D. Elementy matrichnoi teorii tochnosti mnogoinstrumentnoi obrabotki v prostranstvennykh naladkakh [Elements of matrix theory of multitool processing accuracy in three-dimensional setups]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2013, no. 9, pp. 13–17. (In Russian).
7. Hirsch A. *Werkzeugmaschinen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 3. Aufl. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016. 441 p. ISBN 978-3-658-14249-0. DOI: 10.1007/978-3-658-14249-0.
8. Antimonov A.M. *Osnovy tekhnologii mashinnostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2017. 176 p. ISBN 978-5-7996-2132-2.
9. Bagrov B.M., Kozlov A.M. *Mnogotselevye stanki* [Multipurpose machines]. Lipetsk, LSTU Publ., 2004. 193 p. ISBN 5-88247-183-4.
10. Koshin A.A. *Obrabotka na tokarnykh stankakh: naladka, rezhimy rezaniya*. Spravochnik [Processing on lathes: adjustment, cutting conditions. Handbook]. Chelyabinsk, Siti-Print, 2012. 744 p.
11. Yusubov N.D., Abbasova H.M., Khankishiyev İ.A. Entwicklung einer Projektierungstheorie für die Mehrwerkzeugbearbeitung mit den Möglichkeiten der modernen CNC-Werkzeugmaschinen. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2021, vol. 85, pp. 661–678. DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7.
12. Brecher C., Epple A., Neues S., Fey M. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 95, pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.05.003.
13. Budak E., Ozturk E. Dynamics and stability of parallel turning operations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60, iss. 1, pp. 383–386. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.028.
14. Azvar M., Budak E. Multi-dimensional chatter stability for enhanced productivity in different parallel turning strategies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 123, pp. 116–128. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.08.005.
15. Ozturk E., Comak A., Budak E. Tuning of tool dynamics for increased stability of parallel (simultaneous) turning processes. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 360, pp. 17–30. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.009.
16. Chang Z., Chen Z.C., Wan N., Sun H. A new mathematical method of modeling parts in virtual CNC lathing and its application on accurate tool path generation. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, pp. 243–256. DOI: 10.1007/s00170-017-1202-4.
17. Gousskov A.M., Gousskov M.A., Tung D.D., Panovka G. Multi-cutter turning process stability analysis. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2018, vol. 17, pp. 124–129. DOI: 10.21595/vp.2018.19800.
18. Kalidasan R., Yatin M., Sarma D.K., Senthilvelan S. Effect of distance between two cutting tools over cutting forces and heat generation in multi-tool turning process. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 592–594, pp. 211–215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.211.
19. Kalidasan R., Ramanuj V., Sarma D.K., Senthilvelan S. Influence of cutting speed and offset distance over cutting tool vibration in multi-tool turning process. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 984–985, pp. 100–105. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.984-985.100.
20. Kalidasan R., Senthilvelan S., Dixit U.S., Jaiswal V. Double tool turning: machining accuracy, cutting tool wear and chip-morphology. *International Journal of Precision Technology*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 142–158. DOI: 10.1504/IJPTECH.2016.078189.
21. Kalidasan R. *Experimental Investigations on Double Tool Turning Process*. A thesis of Dr. of Philosophy. Guwahati, India, 2017. 133 p.
22. Kalidasan R., Yatin M., Senthilvelan S., Sarma D.K. Preliminary experimental investigation on multi-tool turning process. *Proceedings of the 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference AIMTDR*, Guwahati, 2014, pp. 50-1–50-5.
23. Kalidasan R., Yatin M., Sarma D.K., Senthilvelan S., Dixit U.S. An experimental study of cutting forces and temperature in multi-tool turning of grey cast iron. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2016, vol. 18, no. 5–6, pp. 540–551. DOI: 10.1504/IJMMM.2016.078992.

24. Ahmad R., Tichadou S., Hascoet J.Y. A knowledge-based intelligent decision system for production planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, iss. 5, pp. 1717–1729. DOI: 10.1007/s00170-016-9214-z.
25. Baskar N., Asokan P., Saravanan R., Prabhakaran G. Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 174, iss. 1–3, pp. 239–249. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.032.
26. Orukari B.Dzh. *Tekhnologicheskoe obespechenie avtomatizirovannogo proektirovaniya operatsii mekhanicheskoi obrabotki na dvukhsupportnykh tokarnykh stankakh s ChPU*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Technological support for computer-aided design of machining operation on double-slide CNC lathes. PhD. eng. sci. diss.]. Minsk, 2018. 22 p.
27. Yusubov N., Abbasova H. Models for machining accuracy in multi-tool adjustment. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 8067–8085. DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.
28. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Mesheryakov R.K., Suslov A.G., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya*. V 2 t. T. 1 [Handbook of a mechanical engineer. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 912 p. ISBN 5-94275-013-9.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Применение техники цифровой обработки изображений в анализе микроструктуры и исследовании обрабатываемости

Маноджкumar Шеладия^{1, 2, a, *}, Шейли Ачарья^{3, b}, Ашиш Котари^{2, c, *}, Ганшьям Ачарья^{4, d}

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

² Университет АТМИЯ, Инженерно-технологический факультет, г. Раджкот, 360005, Индия

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

⁴ Институт технологии и науки АТМИЯ, г. Раджкот, 360005, Индия

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

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1981-8465>,  amkothari.ec@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-3580-3116>,  gdacharya@rediffmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:519.6

История статьи:

Поступила: 11 июля 2021

Рецензирование: 30 июля 2021

Принята к печати: 07 сентября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Показатель обрабатываемости
Серый чугун ASTM A 48 Class 20
Алгоритм кластеризации
Поверхность раздела литейная форма–металл

Благодарности:

Группа авторов очень признательна компании KriSlur Castomech Pvt. Ltd., Бхавнагар, Гуджарат, Индия, за предоставление возможности для проведения экспериментов.

АННОТАЦИЯ

Введение. Мир находится на этапе создания междисциплинарного подхода, который будет реализован в металлургических исследованиях. В статье сформулирована техника анализа изображений при исследовании обрабатываемости на различной глубине от границы раздела литейная форма–металл. **Цель работы.** Обработка чугуновой заготовки в пределах первых 3,5 мм от границы раздела литейная форма–металл представляет собой серьезную проблему. Исследование обрабатываемости на различной глубине является ключевым требованием промышленности для простоты обработки. Обрабатываемость будет определять ряд факторов, включая расход инструмента, качество поверхности заготовки, энергопотребление и т. д. **Метод исследования.** Анализ изображения выполняется для определения процентного содержания графита в протравленных и нетравленных образцах. Алгоритм кластеризации позволяет создавать новое изображение из данного с четким разделением белых и черных областей путем преобразования цифрового изображения в двоичное с использованием порогового значения для сегментации. В качестве входных переменных для обрабатываемости чугуна используются объемная доля перлита, объемная доля графита и средний размер пластинок графита в микронах. **Результаты и обсуждение.** Выходное, т. е. сегментированное изображение, будет являться входной функцией для расчета индекса обрабатываемости с использованием формул. Таким образом, микроструктурный анализ поможет предсказать индекс обрабатываемости серого чугуна ASTM A 48 Class 20. С помощью этого метода и программы, основываясь на микроструктуре, можно заранее спрогнозировать характеристики обработки детали с учетом возможных изменений в самом процессе литья.

Для цитирования: Применение техники цифровой обработки изображений в анализе микроструктуры и исследовании обрабатываемости / М.В. Шеладия, С.Г. Ачарья, А.М. Котари, Г.Д. Ачарья // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 21–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-21-32.

Введение

Неоспоримым является тот факт, что теплофизические свойства материала во многом зависят от микроструктуры. Таким образом, ее количественная оценка и характеристика становятся

необходимыми для их прогноза. Анализ изображений в этом случае может иметь ключевое значение. Современное программное обеспечение для анализа изображений может точно определять количество структурных элементов с точки зрения размера, формы и объемной доли [1].

Когда речь идет о микроструктуре, то имеют в виду расположение фаз, дефектов и ориентации зерна. Фаза имеет определенный химический состав и/или кристаллическую структуру и отделена четкой границей. Микро-

*Адрес для переписки

Шеладия Маноджкumar В., к.т.н, доцент
Университет АТМИЯ

Инженерно-технологический факультет,
360005, г. Раджкот, Индия,

Тел.: +91-9898278267, e-mail: mvsheladiya@gmail.com

структуры можно наблюдать и анализировать с помощью различных методов микроскопии [2].

Характеристики микроструктуры, т. е. размер зерна, измеряются в микронном (или миллиметровом) масштабе. Качественные и количественные данные становятся доступны из микроструктуры. Это свидетельствует о важности анализа микроструктурных изображений [3, 4].

В приложении, ориентированном на принятие решений, при сегментации изображения пиксели можно точно классифицировать на несколько различных групп [5, 6]. При сегментации изображения оно делится на несколько дискретных областей на основе сходства пикселей. Существует множество применений этого метода, включая обработку медицинских изображений, здравоохранение, обработку изображений дорожного движения, металлургическую отрасль, распознавание образов и т. д. [7–9]. Существует множество методов сегментации изображений, в том числе на основе кластеризации, нейронных сетей, пороговых значений, границ и т. д. С учетом удобства использования и надежности получаемых результатов лучшая сегментация изображений обычно выполняется методом кластеризации, включая метод K -средних, метод нечеткой кластеризации C -средних, субтрактивную кластеризацию и т. д. [10].

Алгоритм кластеризации K -средних – один из лучших вариантов для пользователей. Он прост в исполнении и быстрее в вычислениях, чем другие кластеры [11], он может работать с большим количеством переменных и давать разные результаты для разных кластеров. Итак, важно начать с правильного количества K -кластеров. После этого необходимо начать с K -значения центроидов. Начальное значение центроидов будет определять кластеры. Таким образом, это показатель того, что правильный выбор значения центроида является важной задачей [12]. Многие методы сегментации цветных изображений были исключены. Но большинство из них основаны на приложениях. Таким образом, универсального метода сегментации цветного изображения до сих пор не существует. Работа кластеризации K -средних показана на рис. 1 в виде блок-схемы.

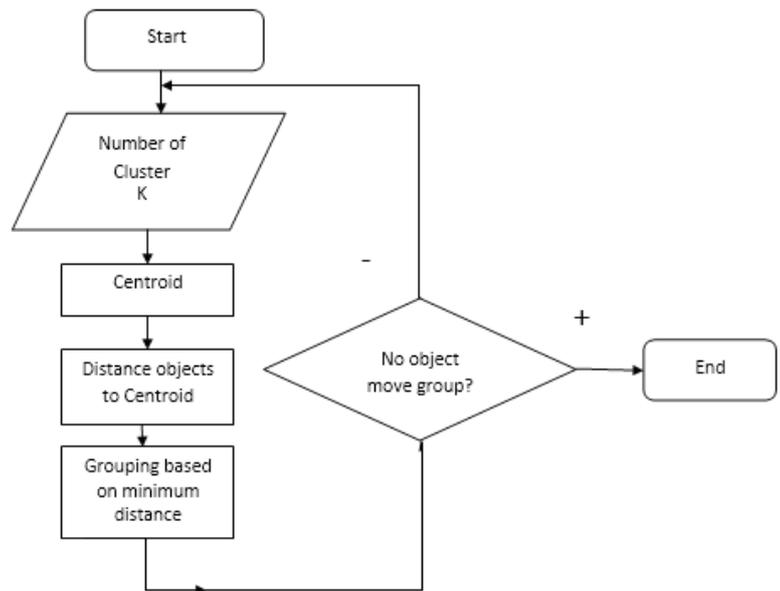


Рис. 1. Блок-схема кластеризации K -средних

Fig. 2. K -means clustering flow chart

Целью работы является получение микроструктурной количественной информации с помощью анализа изображений и ее использование для прогнозирования обрабатываемости материала. Существует тесная взаимосвязь между обрабатываемостью и количественной микроструктурной информацией, доступной с помощью программного обеспечения для анализа изображений. Существует также потребность в применении междисциплинарных подходов в области машиностроения.

Методика исследований

Фундаментальная цель сегментации изображения – преобразование изображения в интерпретируемую форму для дальнейшего анализа. Но большинство входных изображений берутся из разных областей на основе различных приложений. Одни изображения не видны, на других присутствует шум, а некоторые имеют низкое качество. Поэтому перед тем как отправить изображение на сегментацию, его требуется предварительно обработать [13]. Существует много методов предварительной обработки. Эти методы можно классифицировать в зависимости от типа обработки, такой как точечная обработка, обработка с использованием маски, удаление шума и т. д. В зависимости от типа входного изображения используется один из методов. Однако чаще всего используются методы точечной об-

работки, так как они обладают существенными преимуществами. Во многих областях, включая микроструктурную обработку и анализ изображений, цифровая обработка изображений играет очень важную роль. Для обработки пикселей цифрового изображения используется компьютерный алгоритм.

При обработке изображений для более простых задач используются сложные алгоритмы, что приводит к устранению искажений сигнала и нарастающего шума. Двумерные изображения могут быть смоделированы для многомерных систем с использованием цифровой обработки изображений [14, 15]. В этой исследовательской работе тот же метод цифровой обработки изображений используется для характеристики микроструктуры чугуна с пластинчатым графитом.

Существует два способа получения изображений: с помощью цифровой камеры или с помощью аналоговой. Однако такие эффекты, как освещение, шумы, разрешение и прочие, делают необходимым использование техники цифровой обработки изображений. Она дает возможность преобразовать относительно плохое изображение в качественное. В настоящей исследовательской работе изображения пластинчатого графита получены с помощью цифрового микроскопа, и для получения желаемых результатов была проведена дальнейшая обработка.

Наблюдение за микроструктурой выполняется при разном увеличении в соответствии с требованиями. Основная цель микроструктурного анализа – оценка микроструктуры, которая выполняется для соотнесения микроструктуры как входных данных с различными механическими свойствами, включая ковкость, хрупкость и пластичность на выходе [16]. Полученные любым способом микроструктурные изображения с темными пятнами требовали дальнейшей обработки. Она заключалась в предварительной обработке, обнаружении границ и фильтрации [17]. Первоначально изображение сегментируется с заранее заданным пороговым значением с усилением. После этого граница зерен чугуна с пластинчатым графитом идентифицируется с помощью метода обнаружения краев.

Метод кластеризации K -средних

Центральное положение каждого кластера определяется с помощью K -кластеров в мето-

дике кластеризации K -средних [18–20]. Итерации по шагам продолжаются до постоянной минимальной суммы квадратичной ошибки. Типичные шаги включают вычисление среднего значения каждого кластера, присвоение каждой точки ближайшему кластеру на основе вычисления расстояния от среднего значения. При этом соблюдается следующее математическое условие.

$$D = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{d_j} \|G_i - Z_j\|,$$

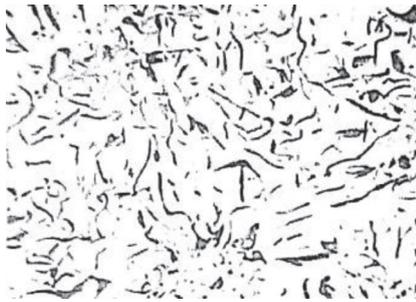
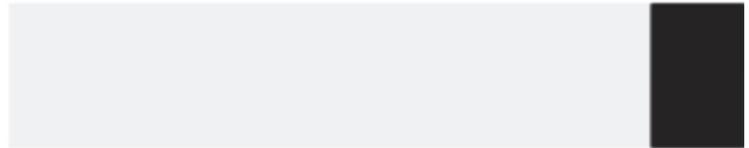
где d_j и Z_j – это количество пикселей и центр j -го кластера; K – общее количество кластеров. Метод K -средних нацелен на минимизацию D и удовлетворяет следующему условию:

$$Z_j = \frac{1}{d_j} \sum_{g_i \in C_j} G_i.$$

В наборе данных $G = \{g_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, g_i – образец в d -мерном пространстве, а $C = \{C_1, C_2, \dots, C_q\}$ – сегмент, который выполнил условие $G = Uq_i = 1 C_i$.

Изображения микроструктуры серого чугуна с пластинчатым графитом оцениваются на предмет обрабатываемости. С этой целью для анализа готовятся тестовые образцы. Обработка чугуновой заготовки в пределах первых 3,5 мм от границы раздела форма–металл является существенной проблемой. Микроструктура, сформированная в пределах первых 3,5 мм от границы раздела форма–металл, оценивается с помощью цифрового микроскопа. Для расчета обрабатываемости необходимо знать значение содержания графита в процентах, которое трудно определить с помощью цифрового микроскопа.

Требование выполняется с помощью кластеризации K -средних в *Python*. На рис. 2 показано входное изображение, подаваемое в программу *Python*, и обработанное изображение справа, доступное как выход данного входного изображения в графической области программного обеспечения *Python*. В табл. 1 приведена процентная доля белой области, которая представляет собой перлит, и процентная доля черной области, являющаяся графитом, полученные в результате кластеризации K -средних. Образцы протравлены в нитали для четкого выявления границ. В табл. 2 представлены выходные данные микроструктуры образца


a

б

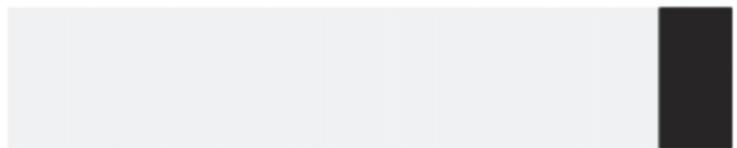
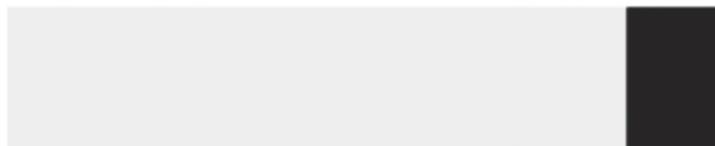
в

г

Рис. 2. Изображение микроструктуры на разной глубине от границы раздела и обработанные изображения:

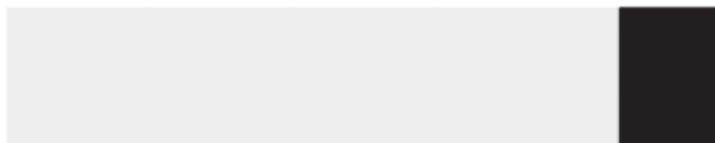
a – на глубине 0,5 мм от поверхности и обработанное изображение; *б* – на глубине 1,0 мм от поверхности и обработанное изображение; *в* – на глубине 1,5 мм от поверхности и обработанное изображение; *г* – на глубине 2,0 мм от поверхности и обработанное изображение; *д* – на глубине 2,5 мм от поверхности и обработанное изображение; *е* – на глубине 3,0 мм от поверхности и обработанное изображение; *ж* – на глубине 3,5 мм от поверхности и обработанное изображение (см. также с. 25)

Fig. 2. Image of microstructure at different depths from interface and processed images:

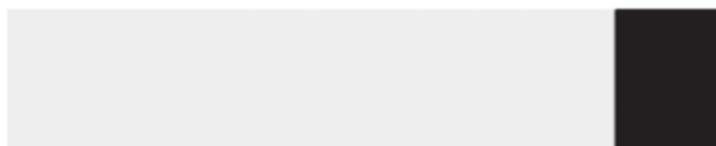
a – at 0.5 mm depth from surface and processed image; *б* – at 1.0 mm depth from surface and processed image; *в* – at 1.5 mm depth from surface and processed image; *г* – at 2.0 mm depth from surface and processed image; *д* – at 2.5 mm depth from surface and processed image; *е* – at 3.0 mm depth from surface and processed image; *ж* – at 3.5 mm depth from surface and processed image (see also p. 25)



д



е



ж

Рис. 2. Окончание
Fig. 2. The End

Таблица 1

Table 1

Полученная на выходе микроструктура нетравленных образцов
Non-Etched Condition sample microstructure output

Глубина от поверхности / Depth from surface	Процент белого / White percentage	Процент черного (графит) / Black Percentage (Graphite)
0,5 мм	84,56	15,44
1,0 мм	87,57	12,43
1,5 мм	87,57	12,43
2,0 мм	90,30	9,70
2,5 мм	86,44	13,56
3,0 мм	85,23	14,77
3,5 мм	84,84	15,16

Полученная на выходе микроструктура травленных образцов
Etched Condition sample microstructure output

Глубина от поверхности / Depth from surface	Процент черного (перлит) / Black Percentage (Pearlite)	Процент белого (феррит) / White Percentage (Ferrite)
0,5 мм	65,73	34,27
1,0 мм	44,41	55,59
1,5 мм	49,98	50,02
2,0 мм	52,02	47,98
2,5 мм	67,30	32,70
3,0 мм	66,51	33,49
3,5 мм	57,57	42,43

в травленном состоянии. Объемный процент перлита и феррита доступен после травления образцов.

Результаты и обсуждение

Важным показателем обрабатываемости в случае твердого черного металла является твердость. В случае серого чугуна микроструктура является более фундаментальным показателем [22].

В 1956 году Мур и Лорд исследовали влияние микроструктуры на показатель обрабатываемости и разработали уравнение, специально предназначенное для серого чугуна [23]:

$$M = 195,5 - 1,26V_{vp} + 11,7V_{vg} + 1,26S_g,$$

где V_{vp} и V_{vg} – относятся к объемным долям перлита и графита в микроструктуре соответственно; S_g – определяется средним размером пластинок графита в микрометрах. В табл. 3 показана взаимосвязь между обрабатываемостью как выходным параметром и микроструктурными параметрами как входными параметрами. На рис. 3 показано изменение обрабатываемости на разной глубине от границы раздела форма–металл.

Заключение

В текущем исследовании изучается показатель обрабатываемости серого чугуна на различной глубине от поверхности. Доступное значе-

ние обрабатываемости достигает максимума на глубине, близкой к 3,5 мм. Объемная доля перлита, графита и средних пластинок графита рассматривается как входная функция для обрабатываемости. Более высокое значение пластинок графита доминирует над значением показателя обрабатываемости.

Список литературы

1. Image based analysis of complex microstructures of engineering materials / T. Wejrzanowski, W. Spychalski, K. Różniatowski, K. Kurzydłowski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2008. – Vol. 18 (1). – P. 33–39.
2. Samuels L.E. Light microscopy of carbon steels. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1999.
3. Electron backscatter diffraction in materials science / A.J. Schwartz, M. Kumar, B.L. Adams, D.P. Field. – 2nd ed. – New York: Springer US Publ., 2009. – 403 p. – ISBN 978-0-387-88135-5. – DOI: 10.1007/978-0-387-88136-2.
4. Krauss G. Steels: processing, structure, and performance. – Materials Park, Ohio: ASM International, 2015.
5. Understanding deep learning techniques for image segmentation / S. Ghosh, N. Das, I. Das, U. Maulik // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2019. – Vol. 52 (4). – P. 1–35.
6. Tu Z., Bai X. Auto-context and its application to high-level vision tasks and 3d brain image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2009. – Vol. 32 (10). – P. 1744–1757.
7. Kang B.-H. A review on image and video processing // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. – 2007. – Vol. 2 (2). – P. 49–64.

Значения обрабатываемости в зависимости от входных параметров
Machinability values vs input parameters

Глубина от поверхности/ Depth from surface	Объемная доля перлита, V_{vp} / Volume fraction of pearlite, V_{vp}	Объемная доля графита, V_{vg} / Volume fraction of Graphite, V_{vg}	Средний размер пластинок графита в мм, S_g / Average size of graphite flakes in mm, S_g	Показатель обрабатываемости, M / Machinability Index, M
0,5	65,73	15,44	3,559	304,0129
1,0	44,41	12,43	5,315	300,9336
1,5	49,98	12,43	5,680	295,0068
2,0	52,02	9,70	5,249	259,2040
2,5	67,30	13,56	5,091	284,6398
3,0	66,51	14,77	6,055	302,6858
3,5	57,57	15,16	5,175	317,5972



Рис. 3. Обрабатываемость на разной глубине от границы раздела $M-M$

Fig. 3. Machinability at different depth from $M-M$ interface

8. Collins T.J. Image for microscopy // Biotechniques. – 2007. – Vol. 43 (S1). – P. S25–S30.

9. Kaur D., Kaur Y. Various image segmentation techniques: a review // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2014. – Vol. 3 (5). – P. 809–814.

10. Dhanachandra N., Chanu Y.J. Image segmentation method using k-means clustering algorithm for color image // Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 2 (11). – P. 68–72.

11. Yedla M., Pathakota S.R., Srinivasa T.M. Enhancing K-means clustering algorithm with improved initial center // International Journal of Computer Science

and Information Technologies. – 2010. – Vol. 1 (2). – P. 121–125.

12. Dhanachandra N., Manglem K., Chanu Y.J. Image segmentation using K-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 54. – P. 764–771.

13. Mode Inference using enhanced Segmentation and Pre-processing on raw Global Positioning System data / A. Nawaz, H. Zhiqiu, W. Senzhang, Y. Hussain, A. Naseer, M. Izhar, Z. Khan // Measurement and Control. – 2020. – Vol. 53 (7–8). – P. 1144–1158.

14. Application of digital image processing for implementation of complex realistic particle shapes/

morphologies in computer simulated heterogeneous microstructures / Singh H., Mao Y., A. Sreeranganathan, A.M. Gokhale // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2006. – Vol. 14 (3). – P. 351–363.

15. Application of digital image processing for automatic detection and characterization of cracked constituent particles/inclusions in wrought aluminum alloys / S.G. Lee, Y. Mao, A.M. Gokhale, J. Harris, M.F. Horstemeyer // *Materials Characterization*. – 2009. – Vol. 60 (9). – P. 964–970.

16. *Kakani S.L.* Material science. – New Delhi: New Age International, 2006. – 656 p.

17. *Narkhede H.P.* Review of image segmentation techniques // *International Journal of Science and Modern Engineering*. – 2013. – Vol. 1 (8). – P. 54–61.

18. *Celebi M.E., Kingravi H.A., Vela P.A.* A comparative study of efficient initialization methods for the k-means clustering algorithm // *Expert Systems with Applications*. – 2013. – Vol. 40 (1). – P. 200–210.

19. *Kodinariya T.M., Makwana P.R.* Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering //

International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. – 2013. – Vol. 1 (6). – P. 90–95.

20. *Likas A., Vlassis N., Verbeek J.J.* The global k-means clustering algorithm // *Pattern Recognition*. – 2003. – Vol. 36 (2). – P. 451–461.

21. *Vermunt J.K.* K-means may perform as well as mixture model clustering but may also be much worse: Comment on Steinley and Brusco // *Psychological Methods*. – 2011. – Vol. 16, no. 1. – P. 82–88.

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

23. *Moore W., Lord J.O.* Gray cast iron machinability: quantitative measurements of graphite and pearlite effects // *Modern Castings*. – 1959. – Vol. 35 (4). – P. 55–60.

Приложение 1: 1 Программа Appendix 1: 1 Program

Программа для кластеризации K -средних в *Python* выглядит так, как показано ниже.
The program for the k -means clustering in *Python* is as under.

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.cluster import KMeans

def centroid_histogram(clt):
    # grab the number of different clusters and create a histogram
    # based on the number of pixels assigned to each cluster
    numLabels = np.arange(0, len(np.unique(clt.labels_)) + 1)
    (hist, _) = np.histogram(clt.labels_, bins = numLabels)
    # normalize the histogram, such that it sums to one
    hist = hist.astype("float")
    hist /= hist.sum()
    # return the histogram
    return hist

def plot_colors(hist, centroids):
    bar = np.zeros((50, 300, 3), dtype = "uint8")
    startX = 0
    for (percent, color) in zip(hist, centroids):
        print('Color = ', color)
        print('Percentage = ', '%.2f' % (percent*100))
        endX = startX + (percent * 300)
        cv2.rectangle(bar, (int(startX), 0), (int(endX), 50), color.astype("uint8").tolist(), -1)
        startX = endX
    return bar

k = 2
image_image = '0.5.jpg'
image = cv2.imread(image_image)
image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)
image = image.reshape((image.shape[0] * image.shape[1], 3))
clt = KMeans(n_clusters = k)
clt.fit(image)
hist = centroid_histogram(clt)
bar = plot_colors(hist, clt.cluster_centers_)
plt.figure()
plt.axis("off")
plt.imshow(bar)
plt.show()
image1 = cv2.imread(image_image)
image1 = cv2.cvtColor(image1, cv2.COLOR_BGR2RGB)
pixel_values = image1.reshape((-1, 3))
pixel_values = np.float32(pixel_values)
criteria = (cv2.TERM_CRITERIA_EPS + cv2.TERM_CRITERIA_MAX_ITER, 100, 0.2)
_, labels, (centers) = cv2.kmeans(pixel_values, k, None, criteria, 10, cv2.KMEANS_RANDOM_CENTERS)
centers = np.uint8(centers)
labels = labels.flatten()
segmented_image = centers[labels.flatten()]
segmented_image = segmented_image.reshape(image1.shape)
plt.figure()
```

```
plt.axis("off")
plt.imshow(segmented_image)
img3 = cv2.hconcat([image1, segmented_image])
cv2.imshow('K Means Clustering', img3)
cv2.waitKey(0) # waits until a key is pressed
cv2.destroyAllWindows() # destroys the window showing image
```

Приложение 2: 2 Программа Appendix 2: 2 Program

На рис. 4 показаны входные данные микроструктуры и соответствующая привязка к сегрегации черно-белой области в качестве выходных данных в *Python*.

Fig. 4. shows the microstructure input data and corresponding snap of the segregation of the black and white area as output in *Python*.

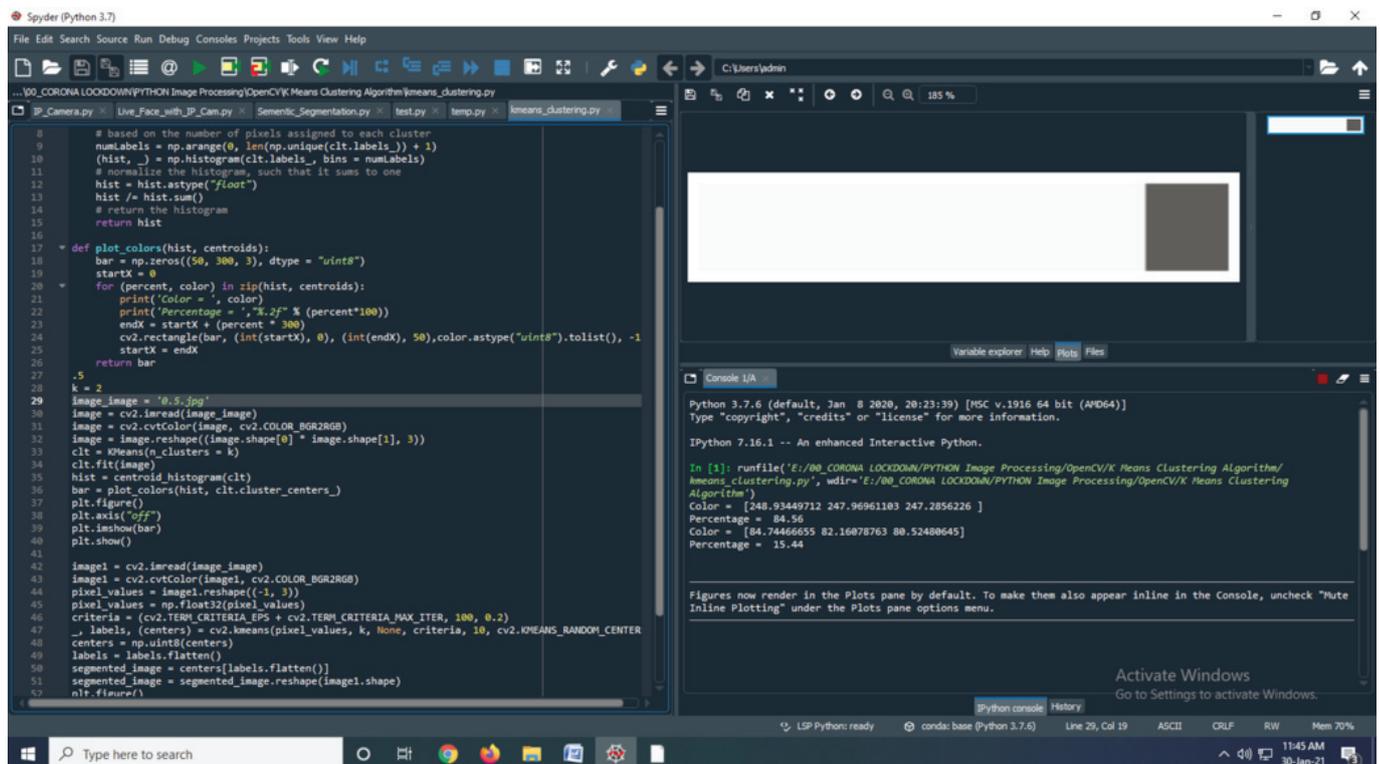


Рис. 4. Микроструктура и сегрегация с помощью кластеризации *K*-средних в *Python*

Fig. 4. Microstructure and segregation by *K*-means clustering in *Python*

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Application of digital image processing technique in the microstructure analysis and the machinability investigation

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

¹ Gujarat Technological University, Ahmedabad, 382424, India

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

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

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

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

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1981-8465>,  amkothari.ec@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-3580-3116>,  gdacharya@rediffmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 July 2021

Revised: 30 July 2021

Accepted: 07 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Machinability Index

ASTM A 48 Class 20

K-means clustering

Mould-metal interface

Acknowledgment

The group of authors is much obligated to the Krislur Castomech Pvt. Ltd., Bhavanagar, Gujarat, India for availing the facility for the experimentation.

ABSTRACT

Introduction. The world is at the stage of creating an interdisciplinary approach that will be implemented in metallurgical research. The paper formulates the technique of image analysis in the study of processing at different depths from the mold-metal interface. **The purpose of the work.** Processing of a cast-iron workpiece within the first 3.5 mm of thickness from the mold-metal interface is a serious problem of solid processing. The study of machinability at different depths is a key requirement of the industry for ease of processing. Machinability will determine a number of factors, including tool consumption, workpiece surface quality, energy consumption, etc. **The method of investigation.** Image analysis is performed to determine the percentage of graphite in etched and non-etched samples. K-means clustering allows to create a new image from a given one with a clear separation of white and black areas by converting a digital image into a binary image using a threshold value for segmentation. The volume fraction of perlite, the volume fraction of graphite and the average size of graphite flakes in microns are used as input variables for the machinability of cast iron. **Results and discussion.** The output, that is, the segmented image, will be the input function for calculating the workability index using formulas. Thus, microstructural analysis will help predict the workability index of grey cast iron ASTM A48 Class 20. Using this method and the program, based on the microstructure, it is possible to predict in advance the characteristics of the machining of the part, taking into account possible changes in the casting process itself.

For citation: Sheladiya M.V., Acharya S.G., Kothari A.M., Acharya G.D. Application of digital image processing technique in the microstructure analysis and the machinability investigation. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-21-32. (In Russian).

References

1. Wejrzanowski T., Spsychalski W., Różniatowski K., Kurzydłowski K. Image based analysis of complex microstructures of engineering materials. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2008, vol. 18 (1), pp. 33–39.
2. Samuels L.E. *Light microscopy of carbon steels*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1999.
3. Schwartz A.J., Kumar M., Adams B.L., Field D.P. *Electron backscatter diffraction in materials science*. 2nd ed. New York, Springer US Publ., 2009. 403 p. ISBN 978-0-387-88135-5. DOI: 10.1007/978-0-387-88136-2.
4. Krauss G. *Steels: processing, structure, and performance*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2015.

* Corresponding author

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

5. Ghosh S., Das N., Das I., Maulik U. Understanding deep learning techniques for image segmentation. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2019, vol. 52 (4), pp. 1–35.
6. Tu Z., Bai X. Auto-context and its application to high-level vision tasks and 3d brain image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, vol. 32 (10), pp. 1744–1757.
7. Kang B.-H. A review on image and video processing. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2007, vol. 2 (2), pp. 49–64.
8. Collins T.J. Image for microscopy. *Biotechniques*, 2007, vol. 43 (S1), pp. S25–S30.
9. Kaur D., Kaur Y. Various image segmentation techniques: a review. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2014, vol. 3 (5), pp. 809–814.
10. Dhanachandra N., Chanu Y.J. Image segmentation method using k-means clustering algorithm for color image. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 2015, vol. 2 (11), pp. 68–72.
11. Yedla M., Pathakota S.R., Srinivasa T.M. Enhancing K-means clustering algorithm with improved initial center. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2010, vol. 1 (2), pp. 121–125.
12. Dhanachandra N., Manglem K., Chanu Y.J. Image segmentation using K-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 54, pp. 764–771.
13. Nawaz A., Zhiqiu H., Senzhang W., Hussain Y., Naseer A., Izhar M., Khan Z. Mode Inference using enhanced Segmentation and Pre-processing on raw Global Positioning System data. *Measurement and Control*, 2020, vol. 53 (7–8), pp. 1144–1158.
14. Singh H., Mao Y., Sreeranganathan A., Gokhale A.M. Application of digital image processing for implementation of complex realistic particle shapes/morphologies in computer simulated heterogeneous microstructures. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, vol. 14 (3), pp. 351–363.
15. Lee S.G., Mao Y., Gokhale A.M., Harris J., Horstemeyer M.F. Application of digital image processing for automatic detection and characterization of cracked constituent particles/inclusions in wrought aluminum alloys. *Materials Characterization*, 2009, vol. 60 (9), pp. 964–970.
16. Kakani S.L. *Material science*. New Delhi, New Age International, 2006. 656 p.
17. Narkhede H.P. Review of image segmentation techniques. *International Journal of Science and Modern Engineering*, 2013, vol. 1 (8), pp. 54–61.
18. Celebi M.E., Kingravi H.A., Vela P.A. A comparative study of efficient initialization methods for the k-means clustering algorithm. *Expert systems with applications*, 2013, vol. 40 (1), pp. 200–210.
19. Kodinariya T.M., Makwana P.R. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2013, vol. 1 (6), pp. 90–95.
20. Likas A., Vlassis N., Verbeek J.J. The global k-means clustering algorithm. *Pattern Recognition*, 2003, vol. 36 (2), pp. 451–461.
21. Vermunt J.K. K-means may perform as well as mixture model clustering but may also be much worse: Comment on Steinley and Brusco. *Psychological Methods*, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 82–88.
22. Sheladiya M.V., Acharya S.G., Acharya G.D. Technological investigation of effect of machining parameter on tool life. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 41–53. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-41-53. (In Russian).
23. Moore W., Lord J.O. Gray cast iron machinability: quantitative measurements of graphite and pearlite effects. *Modern Castings*, 1959, vol. 35 (4), pp. 55–60.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние параметров сквозного деформирующего резания на характер получаемых щелевых фильтрующих структур

Дмитрий Бузаев^{a, *}, Николай Зубков^b

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7258-7379>,  dm.buzaev@bmstu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-3757-1299>,  zoubkovn@bmstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.042:542.67

История статьи:

Поступила: 09 августа 2021
 Рецензирование: 31 августа 2021
 Принята к печати: 16 октября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Фильтрация
 Фильтрующие трубы
 Регенерация противотоком
 Щелевые фильтры
 Деформирующее резание

АННОТАЦИЯ

Введение. Щелевые фильтры востребованы в нефтехимической, машиностроительной, пищевой, горнообогатительной и других отраслях промышленности. Деформирующее резание (ДР) является методом лезвийной обработки, основанном на подрезании и пластическом деформировании поверхностного слоя заготовки без его отделения в виде стружки, и выделяется среди других методов образования щелевых структур возможностью получения фильтров высокой тонкости фильтрации (ширина щелей от 20 мкм) при сравнительно высокой производительности и безотходности. Однако закономерности сквозного прорезания металлов методом ДР практически не были изучены ранее. **Цель работы:** установление влияния основных параметров деформирующего резания: подачи и глубины резания – на характер получаемых структур, а также выявление сочетаний параметров, при которых обеспечивается получение структур, пригодных для фильтрации. **Методом исследования** являлись эксперименты по сквозному прорезанию гофров, отштампованных на лентах из меди, и визуальный анализ полученных структур. Прорезание гофров методом ДР производилось на токарном станке с использованием приспособления – барабана с натяжителем. **Результаты и обсуждение.** Характерные структуры, полученные при различных сочетаниях глубины резания и подачи, были систематизированы и выделены в следующие группы: 0 – отсутствие сквозного прорезания; 1 – равномерные щели; 2 – «двойникование» (попарное сближение стенок щелей); 3 – срывы через одно ребро; 4 – нерегулярные либо постоянные срывы; 5 – равномерные щели с образованием сплошного заусенца – «юбки» – на внутренней стороне гофра вдоль ряда щелей; 6 – равномерные щели с неполностью раскрытой «юбкой». В интервале подач 0,2...0,4 мм/об с увеличением глубины резания наблюдается переход от структур группы 1 к структурам группы 2, причем чем больше подача, тем больше максимальная глубина резания, при которой сохраняются равномерные щели. Группа 1 отнесена к области структур, пригодных для задач фильтрации, однако она характеризуется образованием индивидуальных заусенцев с внутренней стороны щелей. При меньших подачах (до 0,2 мм/об включительно) с дальнейшим увеличением глубины резания достигается ещё одна область структур, признанных пригодными для получения фильтров, – групп 5 и 6. При образовании «юбки» отсутствуют индивидуальные заусенцы для каждой щели, форма щелей более чистая. С уменьшением подачи уменьшается ширина получаемых щелей. Наименьшая подача, при которой получены равномерные щели, 0,05 мм/об, что соответствует ширине щелей 19 мкм. Установление причин образования «юбок» и «двойникования» потребуют дальнейшего исследования.

Для цитирования: Бузаев Д.А., Зубков Н.Н. Влияние параметров сквозного деформирующего резания на характер получаемых щелевых фильтрующих структур // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 33–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-33-46.

Введение

Необходимость фильтрации жидкостей и газов возникает во многих отраслях промышленности, таких как нефтехимическая, машино-

строительная, пищевая, горнообогатительная и другие, а также при организации различных систем водоснабжения [1].

Из металлических фильтроэлементов получили распространение сетчатые [2], а также полученные методом порошковой металлургии и из металлической пены с диаметром пор от 50 мкм [3] и др.

В большинстве случаев при загрязнении фильтроэлемента необходима остановка процесса фильтрации для его замены [2], что тре-

*Адрес для переписки

Бузаев Дмитрий Александрович, ассистент
 Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
 ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
 105005, г. Москва, Россия
 Тел.: +7 (903) 679-96-59, e-mail: dm.buzaev@bmstu.ru

бует значительных расходов. Перспективными являются регенерируемые конструкции фильтров, осуществляющие его очистку противотоком фильтрующей среды [4]. Щелевая структура фильтра в таких конструкциях предпочтительна, так как обеспечивает как сравнительно низкое гидравлическое сопротивление, так и высокую эффективность очистки противотоком [5]. Очистка противотоком выполняется без разборки фильтра и увеличивает эксплуатационный ресурс фильтроэлемента в 20 и более раз [6].

Среди щелевых фильтров наиболее распространены сборные конструкции, а также конструкции, получаемые механической или физико-технической обработкой [7, 8].

На основе проволоки получают сетки, в том числе с неквадратными ячейками, пружинные и каркасно-проволочные фильтроэлементы. Ленточные и пластинчатые фильтры также относятся к сборным конструкциям и не отличаются высокой технологичностью и производительностью их получения. По комплексу эксплуатационных параметров наиболее перспективны каркасно-проволочные сетки с возможностью получения щелевых зазоров от 20 мкм, однако их высокая стоимость ограничивает широкое применение [9].

Механические методы получения сквозных щелей основаны на фрезеровании стенки трубы дисковыми фрезами и методах обработки давлением. Широкую номенклатуру щелевых сеток получают обработкой давлением как методом штамповки щелей, так и методом одновременной просечки и вытяжки [10].

Перспективным направлением в изготовлении щелевых фильтрующих перегородок является применение лазерной и электроэрозионной прошивной или проволочной обработки [11, 12]. В качестве заготовки могут использоваться листы или трубы различного профиля. Ограничением использования является высокая стои-

мость оборудования и относительно низкая производительность.

Перечисленные методы получения металлических щелевых фильтрующих перегородок имеют ограничения либо по минимальной ширине получаемых щелей, либо по производительности их получения, что сказывается на ограничении эксплуатационных характеристик и высокой себестоимости их изготовления.

В данной работе рассматривается получение фильтрующих структур методом деформирующего резания (ДР).

Деформирующее резание является запатентованным видом лезвийной обработки резанием с использованием специального инструмента [13]. Метод основан на подрезании и пластическом деформировании подрезанных слоев с формированием макрорельефа в виде оребрения (рис. 1). Особенности этого метода являются безотходность, а также возможность получения узких (до десятков микрометров) межреберных зазоров при глубине зазоров до единиц миллиметров.

Ранее рассматривалась возможность получения фильтрующих титановых сеток методом ДР из тонколистовых заготовок с получением минимального размера фильтрующих щелей

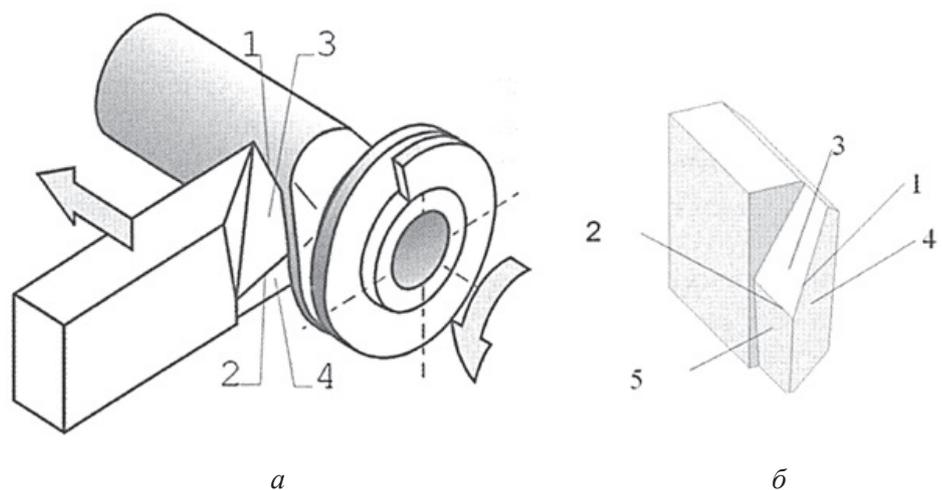


Рис. 1. Схема оребрения труб методом ДР (а) и инструмент для его реализации (б):

1 – режущая кромка; 2 – деформирующая кромка; 3 – передняя поверхность; 4 и 5 – главная задняя и вспомогательная задняя поверхности

Fig. 1. Scheme of pipe finning by the DR method (a) and the tool for its implementation (b):

1 – cutting edge; 2 – deforming edge; 3 – front surface; 4 and 5 – main back and auxiliary back surfaces

от 20 мкм с возможностью увеличения размеров ячейки растяжением до единиц миллиметров [14].

Ранее было проведено исследование по изучению процесса получения щелевых структур методом ДР на полимерных трубах, в котором установлена целесообразность применения метода при получении регулируемых щелевых фильтрующих труб, предложены схемы обработки, выявлены особенности и ключевые зависимости процесса, даны рекомендации по реализации метода и проведены испытания эксплуатационных характеристик полученных фильтров [15, 16]. Физико-механические свойства полимерных материалов и их невысокая термостойкость существенно ограничивают область их применения. Металлические фильтро-элементы с щелевой структурой, полученной ДР, устраняют эти недостатки. Принцип получения фильтрующих щелевых металлических труб при сквозном прорезании участков специальных профилей был опубликован ранее [17]. Однако влияние технологических параметров сквозного прорезания металлической заготовки методом ДР на форму и геометрические параметры получаемых щелей не исследовалось. Цель данной работы – установление влияния параметров ДР, а именно подачи и глубины резания на характер, форму щелевых структур, получаемых методом сквозного ДР на медных образцах.

Методика исследований

На предыдущих этапах исследования было апробировано и признано целесообразным использование в качестве заготовок для металлических фильтров продольно гофрированных (звездообразных) труб (рис. 2), полученных с помощью шариковых фильер [18].

Продольно гофрированные трубы доступны для получения в промышленных масштабах с использованием специального оборудования [19] и представляют интерес в качестве заготовок при серийном производстве фильтрующих труб. Однако их получение само по себе является достаточно сложной технологической задачей, которую необходимо решать для каждого типоразмера и материала заготовки.

Для изучения процесса сквозного прорезания методом ДР и получения массива эксперимен-



Рис. 2. Прорезание щелей на продольно гофрированной трубе методом ДР

Fig. 2. Cutting slots on a longitudinally corrugated pipe using the DR method

тальных данных более целесообразной признана схема обработки единичных гофров, изготовленных на металлической ленте с использованием специального приспособления (рис. 3), установленного на токарно-винторезный станок модели 16Б16КА.

Гофрированная лента 2 обернута вокруг барабана 5, установленного на токарно-винторезном станке. Плотное прилегание ленты к барабану осуществляется за счет радиального перемещения подпружиненного натяжителя 4, в который зажаты оба конца ленты. В качестве допущения принято, что натяжение ленты не приводило к изменению геометрических параметров ленты.

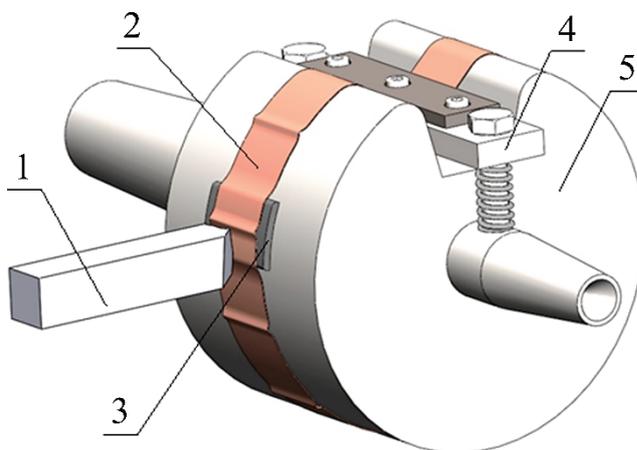


Рис. 3. Схема сквозного прорезания единичного гофра на барабане

Fig. 3. Scheme of cutting through a single corrugation using a barrel attachment

В рамках каждого эксперимента инструментом 1 для ДР прорезается только один из гофров ленты за счет подкладки 3 из полиэтилена низкого давления.

По сравнению с обработкой непосредственно гофрированных труб такая схема позволяет нивелировать влияние разновысотности гофров и биения трубы на прорезание щелей и упрощает контроль над процессом. Для каждого гофра глубина резания выставляется индивидуально от касания поверхности гофра вершиной резца, что позволяет получать более точные результаты экспериментов.

Гофры были получены штамповкой эластичной средой, в качестве которой был выбран твердый полиуретан (рис. 4).

Стальной формовочный пруток 5 диаметром 1,5 мм размещался между лентой 2 и стальным пуансоном 3, после чего лента и пруток с усилием запрессовывался пуансоном в полиуретановую подушку 4, помещенную в полости обоймы 1, в результате чего лента частично огибала пруток, образуя гофр. Для взаимного позиционирования прутка и ленты в обойме предусмотрены направляющие пазы.

Геометрические параметры гофра (рис. 5) определяются диаметром прутка, толщиной и материалом ленты, а также усилием прессования

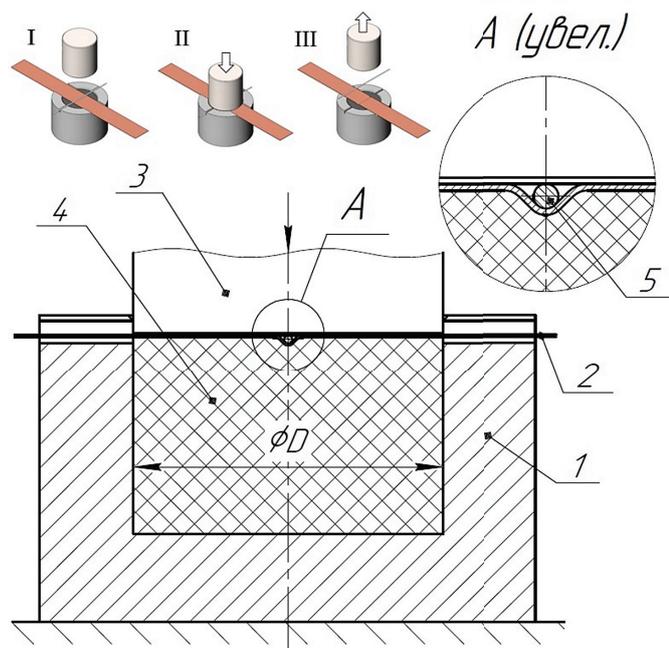


Рис. 4. Штамповка гофров полиуретаном

Fig. 4. Stamping corrugations with polyurethane

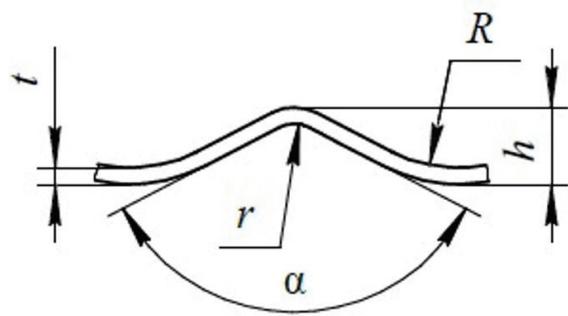


Рис. 5. Параметры получаемого гофра

Fig. 5. Parameters of corrugation obtained

и составляют $t = 0,4$ мм; $r = 0,75$ мм; $R = 3,6$ мм, $h = 1,9$ мм.

При получении щелей методом деформирующего резания зависимость их ширины b от подачи S_0 и углов инструмента в плане φ и φ_1 имеет вид [20]

$$b = S_0(\sin\varphi_1 - \sin\varphi).$$

В соответствии с данной зависимостью ширина щелей теоретически принимает нулевое значение при равенстве главного φ и вспомогательного φ_1 углов инструмента в плане. Однако для фильтрации желательно иметь щелевой зазор, перпендикулярный к оси трубной заготовки, что требует назначения вспомогательного угла инструмента в плане φ_1 , близким к 90° . Таким образом, ширина щелевого зазора будет определяться главным углом инструмента в плане φ и величиной подачи S_0 . Зависимость теоретической ширины щелевого зазора от подачи инструмента при разных углах φ представлена на рис. 6. Влияние вспомогательного угла инструмента в плане φ_1 на ширину щелевого зазора незначительно и показано на рис. 7.

Длина щелей l зависит от профиля гофров и глубины резания. После начала сквозного прорезания длина щелей резко увеличивается до достижения глубины резания $t_r = 0,45$ мм, соответствующей окончанию радиусного участка r (см. рис. 5) на вершине гофра и переходу к боковым участкам. Так как сечение боковых участков профиля гофров близко к прямой, при дальнейшем увеличении глубины резания длина щелей возрастает линейно (рис. 8).

Из вышесказанного можно сделать вывод, что для обеспечения наибольшей пропускной способности фильтроэлемента при той же тон-

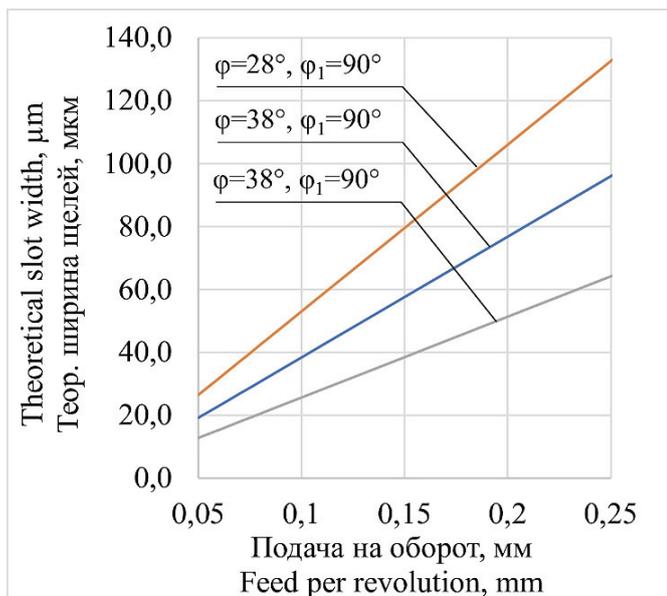


Рис. 6. Теоретическая ширина щелей b в зависимости от подачи инструмента S на оборот для различных значений главного угла в плане φ

Fig. 6. Theoretical slot width vs tool feed for various values of major cutting edge angle φ

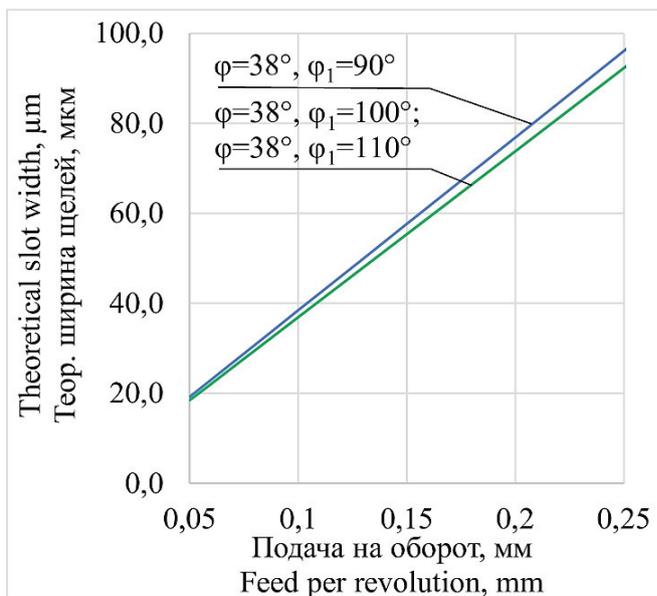


Рис. 7. Теоретическая ширина щелей b в зависимости от подачи инструмента S на оборот для различных значений вспомогательного угла в плане φ_1

Fig. 7. Theoretical slot width b vs tool feed S for various values of minor cutting edge angle φ_1

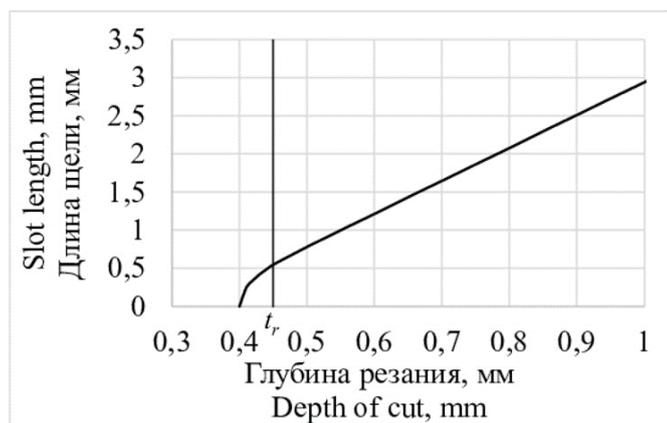


Рис. 8. Теоретическая длина щелей l в зависимости от глубины резания t

Fig. 8. Theoretical slot length l vs depth of cut t

кости фильтрации следует стремиться к глубине резания не меньше глубины t_r , обеспечивающей полное прорезание радиусного участка r .

В качестве инструментального материала для сквозного прорезания гофров методом ДР использовался твердый сплав H10F фирмы Sandvik Coromant. Параметры используемого при проведении экспериментов инструмента представлены в таблице. Погрешность угловых параметров составляла $\pm 1^\circ$.

Выбор геометрии инструмента для проведения эксперимента сделан на основе опыта применения резцов для деформирующего резания [21]: передний, главные и вспомогательные задние углы выбраны как типовые для резцов, предназначенных для получения оребрения методом ДР. Вспомогательный угол инструмента в плане φ_1 назначен близким к 90° для обеспечения перпендикулярности щелевого зазора. Главный угол в плане назначен равным 38° из соображений получения наименьшего межреберного зазора при сохранении удовлетворительной конструктивной прочности инструмента.

Материал и геометрические параметры резца для ДР

Material and geometrical parameters of the DC cutter

φ	φ_1	γ	γ_1^*	λ	λ_1^*	α	α_1
$38,4^\circ$	$87,6^\circ$	47°	-60°	$54,4^\circ$	0°	3°	3°

* – для справок / for reference.

Значение скорости резания в рамках данного исследования было принято за константу и выбрано равным 207 м/мин исходя из удобства наблюдения за проведением эксперимента.

Диапазон глубины резания выбирался таким образом, чтобы в него входили границы, с одной стороны, начала сквозного прорезания материала, с другой – начала дестабилизации процесса получения щелей (нерегулярного или сплошного срыва ребер). При отсутствии срывов глубина резания увеличивалась до касания вершиной инструмента впадины гофра.

При выбранных углах в плане подача 0,4 мм/об согласно вышеприведенной формуле соответствует ширине щелей 151 мкм. При дальнейшем увеличении подачи стабильность процесса согласно известным закономерностям ДР будет только возрастать вплоть до достижения подач, при которых вместо ДР происходит обычное выдавливание материала. Поэтому значе-

ние подачи 0,4 мм/об было принято за верхнюю границу, а основное внимание уделено получению структур с меньшим межреберным зазором (и большей тонкостью фильтрации). Нижняя граница рассмотренных подач (0,05 мм/об) обусловлена технологическими возможностями используемого оборудования.

Результаты и их обсуждение

По результатам 167 экспериментов при различных значениях подачи и глубины резания выделено 6 групп, на основе которых все множество рассмотренных сочетаний параметров ДР – подачи и глубины резания – было разделено на несколько областей (рис. 9) в зависимости от степени пригодности полученных структур для фильтрации. На диаграмме отмечался наиболее частый для каждой комбинации параметров результат по нескольким

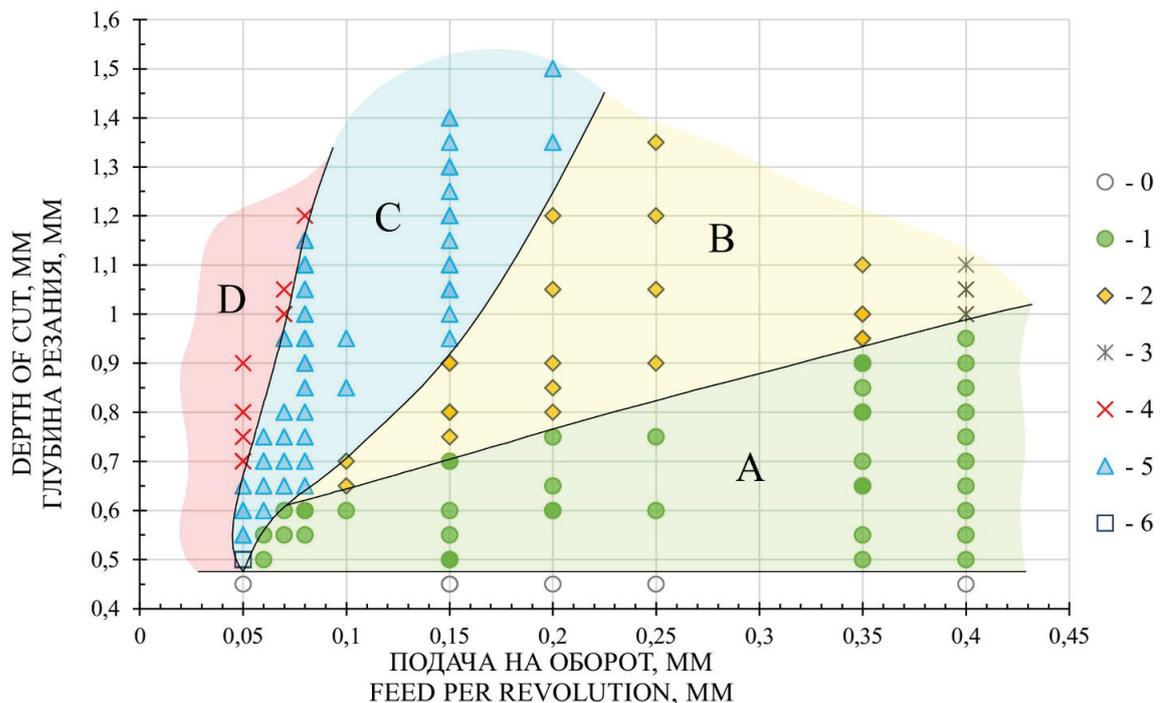


Рис. 9. Диаграмма форм структур, полученных при различных сочетаниях подачи и глубины резания:

0 – непрорез; 1 – равномерные щели; 2 – «двойникование»; 3 – срыв через одно ребро; 4 – нерегулярные/постоянные срывы; 5 – равномерные щели с образованием «юбки»; 6 – щели с частично нераскрывшейся «юбкой»

Fig. 9. Diagram of typical structures obtained under different combinations of tool feed and depth of cut:

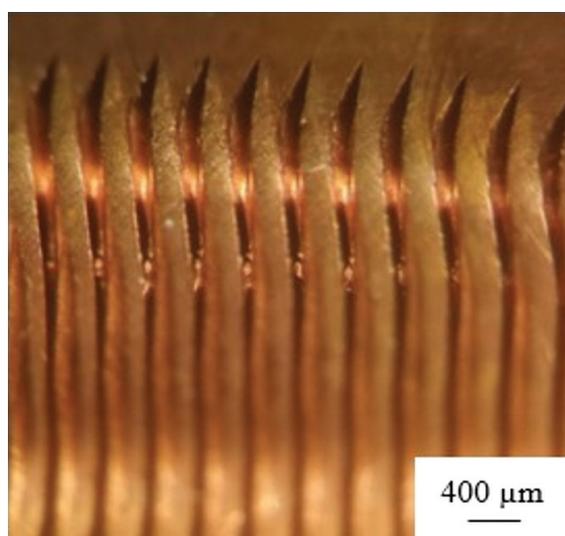
0 – absence of the through cut; 1 – uniform slots; 2 – “twinning”; 3 – stripping of every second slot wall; 4 – non-regular or complete stripping of slot walls; 5 – uniform slots with a formed “skirt”; 6 – uniform slots with a “skirt” opened incompletely

экспериментам. Каждая из групп результатов описана далее.

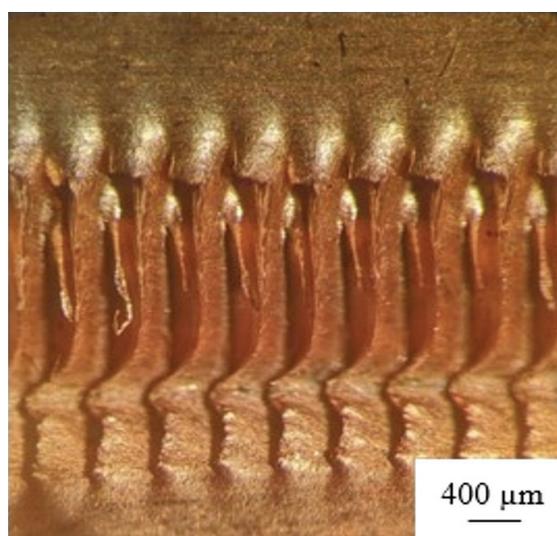
Группа «0» – непрорез. Оребрение на наружной поверхности гофров при отсутствии сквозного прорезания гофра отмечено на глубинах резания, превышающих номинальную толщину ленты, что объясняется погрешностью толщины ленты и упругими деформациями гофрированного профиля.

Группа «1» – равномерные щели (рис.10). Эта группа образует на диаграмме (см. рис. 9) область «А» (выделена зелёным), которая является целевой при изготовлении фильтрующих элементов. Процесс ДР стабилен, щели имеют

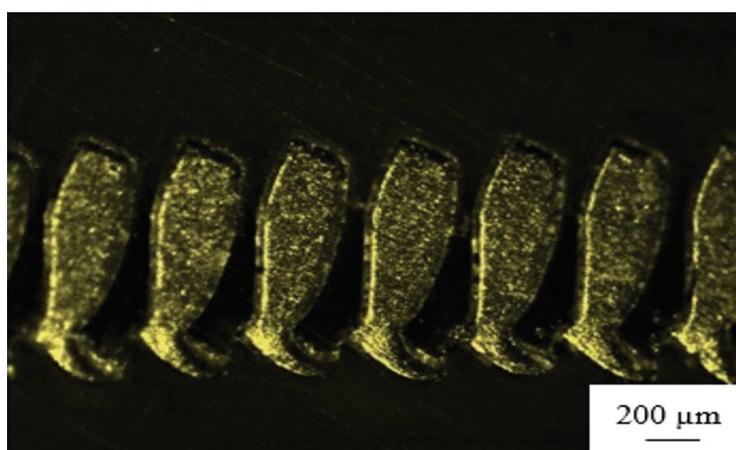
визуально равномерную ширину. В соответствии с известными для ДР зависимостями максимальная глубина резания, при которой сохраняется стабильность процесса, увеличивается с увеличением подачи. Минимальная подача, при которой в ходе экспериментов удалось получить равномерные щели такого типа – 0,06 мм/об при глубине резания 0,55 мм, чему соответствуют теоретические ширина и длина щелей 23 мкм и 1 мм соответственно. На внутренней стороне гофров отмечено образование заусенцев в каждом месте выхода резца из материала. Это следует учитывать в дальнейшем при практической реализации метода.



a



б



в

Рис. 10. Равномерные ряды щелей:

a – наружная сторона; *б* – внутренняя сторона; *в* – шлиф поперечного сечения щелей

Fig. 10. Uniform slots:

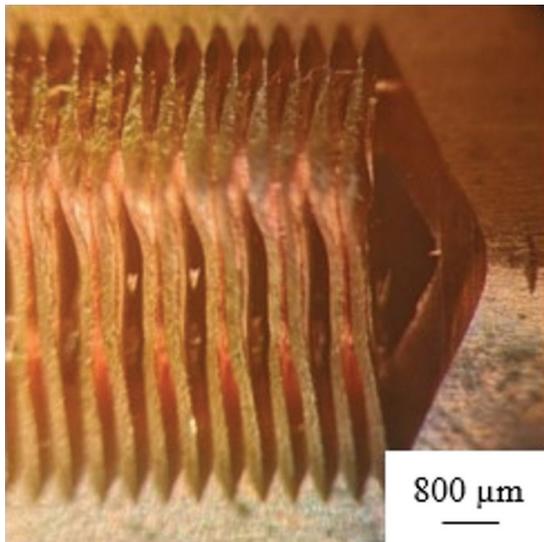
a – outer side; *б* – inner side; *в* – slots cross section

Группа «2» – двойникование (рис. 11). При глубинах резания, выходящих за пределы верхней границы области «А», отмечено попарное сближение ребер, ограничивающих щели, условно названное двойникованием, приводящее к «схлопыванию» каждой второй щели, что при неизменной толщине ребер увеличивает ширину несхлопнувшихся щелей. В отдельных случаях при дальнейшем увеличении глубины резания наблюдался также переход от попарного группирования ребер (дублетами) к группированию по 3 шт. (триплетами). Эти случаи также были условно отнесены к группе «2». Несмотря на то что такие структуры обладают регулярностью, на данный момент для них не обнаружено потенциального полезного применения для задач фильтрации, и потому они относятся к области

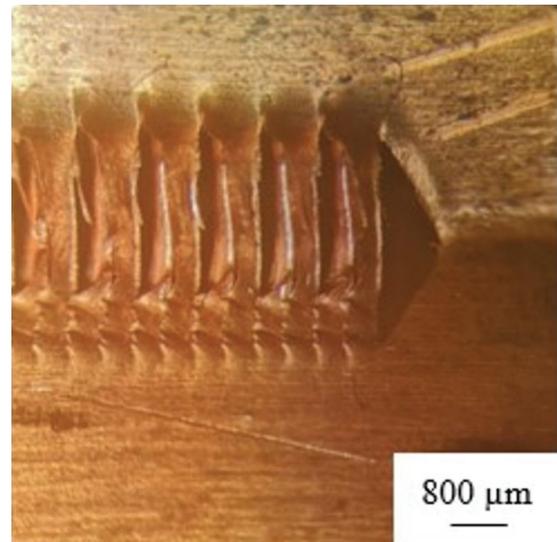
условного брака – область «В» на диаграмме (см. рис. 9).

Группа «3» – срыв через 1 ребро (рис. 12). При подаче 0,4 мм/об и глубине резания 1 мм и более отмечено попарное сближение ребер, сопровождающееся срывом одного из ребер в каждой паре. Данный эффект также отнесён к области условного брака «В».

Группа «4» – нерегулярные срывы (рис. 13). Как и при обычном деформирующем резании, при малых по отношению к глубине резания подачах отмечена нестабильность процесса, характеризующаяся срывом некоторых или всех ребер с превышением предела прочности материала ребра под воздействием инструмента для ДР. Данная группа отнесена к области «D» на диаграмме (см. рис. 9) – «брак».



a



б



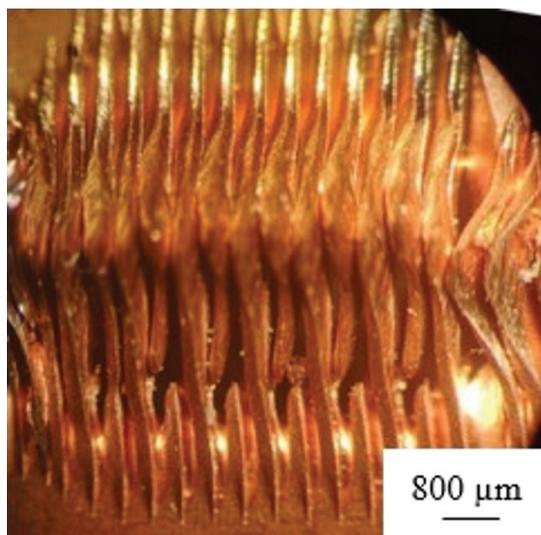
в

Рис. 11. «Двойникование»:

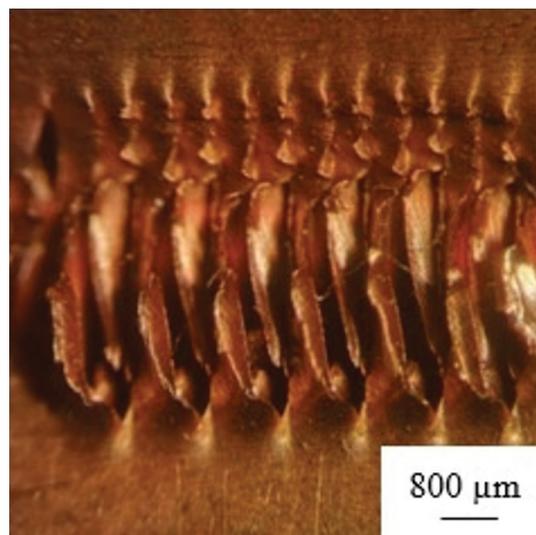
a – наружная сторона; *б* – внутренняя сторона; *в* – шлиф поперечного сечения щелей

Fig. 11. “Twinning” – pairwise convergence of slot walls:

a – outer side; *б* – inner side; *в* – slots cross section



а



б

Рис. 12. Срыв через одно ребро:

а – наружная сторона; б – внутренняя сторона

Fig. 12. Stripping of every second slot wall:

а – outer side; б – inner side

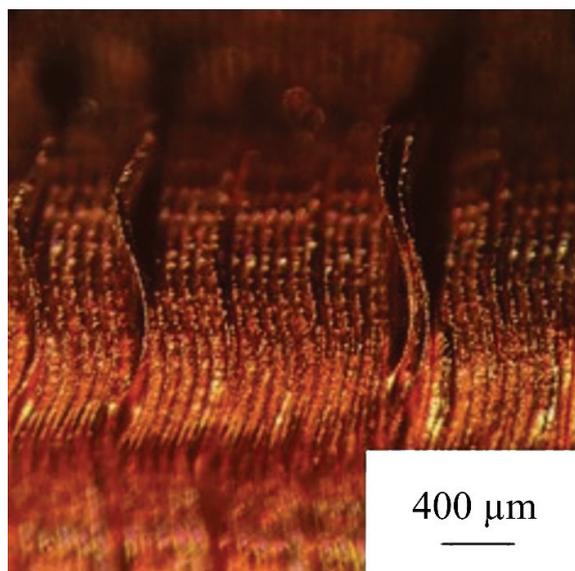


Рис. 13. Нерегулярные срывы (наружная сторона)

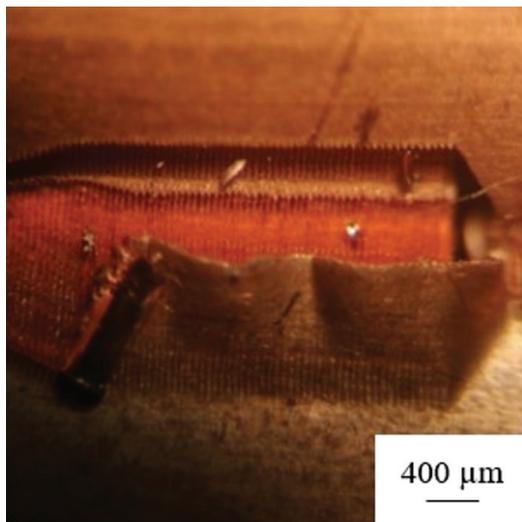
Fig. 13. Non-regular stripping of slot walls (outer side)

Группа «5» – *Равномерные щели с образованием юбки* (рис. 14). При подаче 0,2 мм/об и меньше был отмечен следующий эффект: при выходе инструмента из материала на внутренней стороне гофров заусенцы образуются не у каждого ребра по отдельности, а в виде единой ленты-фольги, отогнутой от материала инстру-

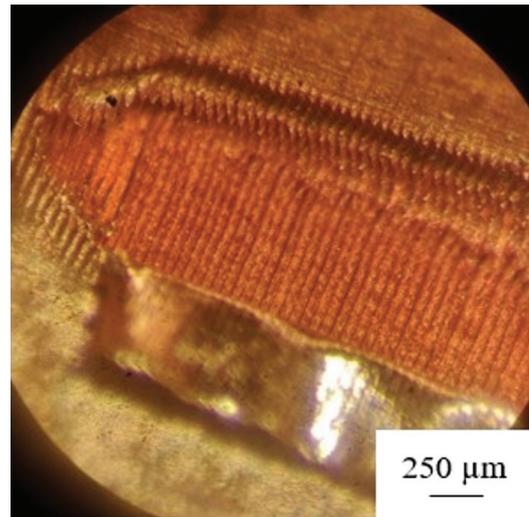
ментом и нависающей над рядом щелей. Эта лента далее будет условно называться «юбкой». Образование юбки может быть обусловлено свойствами поверхностного слоя материала и требует дальнейшего изучения.

При образовании юбки эффектов «двойничкования» не наблюдается, щели имеют визуальную равномерную ширину. Кроме того, при отгибании (см. рис. 14) и удалении юбки механически под ней обнаруживается щелевая структура, отличающаяся большей чистотой и отсутствием заусенцев по сравнению с группой «1», где также получались равномерные щели, но без образования юбки. Как следствие, группа результатов «5» отнесена к области «С» на диаграмме (см. рис. 9), которую можно охарактеризовать как область потенциально пригодных для задач фильтрации структур наравне с областью «А».

Группа «6» – *Щели с частично нераскрывшейся юбкой* (рис. 15). При наименьшей из рассмотренных подач – 0,05 мм/об – было отмечено образование «юбки» сразу же при достижении минимальной глубины резания, достаточной для сквозного прорезания гофра. При таких малых глубинах резания «юбка» частично сохраняет связь с материалом по обеим сторонам гофра, что затрудняет ее удаление и свободное прохождение фильтруемой среды через щели. Тем не



a



б

Рис. 14. Равномерные щели с образованием юбки:
a – вид юбки после прорезания щелей; *б* – юбка отогнута в сторону.

Fig. 14. Uniform slots with a continuous burr (“skirt”) formed:
a – view on the skirt after cutting through slits, *б* – the skirt is bent aside

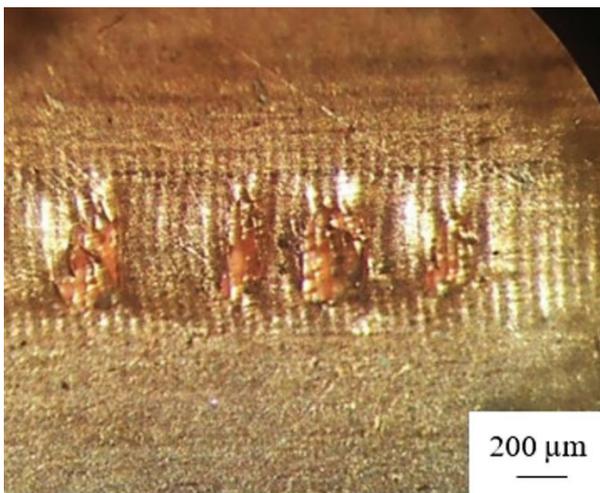


Рис. 15. Щели с частично нераскрывшейся юбкой

Fig. 15. Slots with a skirt opened incompletely

менее, так как структура щелей равномерна и теоретическая возможность удаления юбки сохраняется, данная группа также отнесена к области «С» на диаграмме.

Распределение полученных результатов показало, что в интервале подач 0,25...0,4 мм/об сохраняется известная для деформирующего резания закономерность: с увеличением глубины резания при достижении определенного от-

ношения t/S наблюдается дестабилизация процесса ДР и проявление нежелательных эффектов (дублеты, триплеты, срывы), причем чем больше подача S , тем больше максимальная глубина резания t_{max} , при которой стабильность процесса сохраняется. Однако отмеченные при подаче 0,4 мм/об срывы имеют регулярный попарный характер. Это может рассматриваться как предельный случай попарного группирования ребер, наблюдающегося при меньших подачах.

При подачах 0,1...0,2 мм/об с увеличением глубины резания (см. рис. 9 и 16) наблюдается переход от равномерных щелей (группа «1») к группированию ребер без срывов (группа «2»), а затем с началом образования «юбки» щели снова приобретают равномерную структуру (группа «5»).

Такая закономерность обнаружена впервые и может объясняться особенностями образования заусенцев с углом выхода вершины инструмента из материала, на который непосредственно влияет глубина резания. В частности, наличие заусенца только на одном из двух ребер в дублетах и на одном из трех ребер в триплетах (см. рис. 12 и рис. 16) может быть результатом притягивания соседних ребер общим заусенцем и последующего отрыва заусенца от всех ребер, кроме одного.

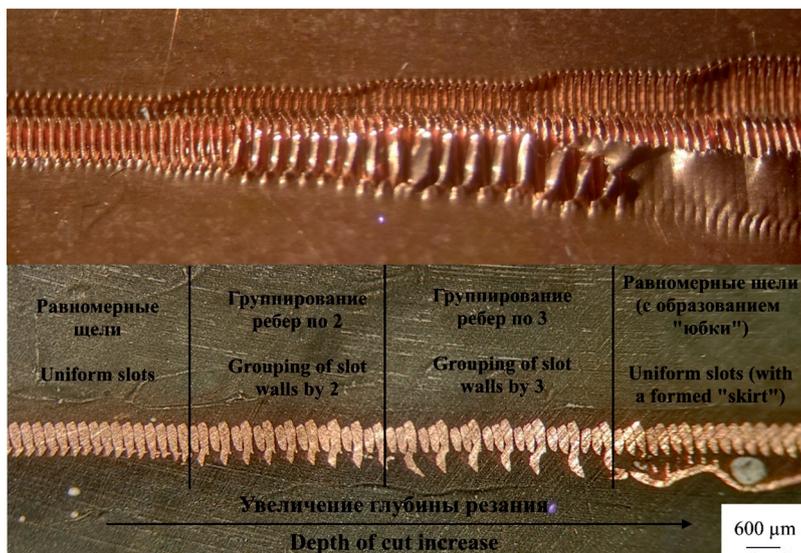


Рис. 16. Изменение получаемой структуры с увеличением глубины резания

Fig. 16. Evolution of the structures obtained with depth of cut increase

В интервале подач 0,06...0,08 мм/об участок «двойникования» отсутствует, с увеличением глубины наблюдается переход напрямую от равномерных щелей (группа «1») к равномерным щелям с образованием «юбки» (группа «5»), а при подаче 0,05 мм/об отсутствует и участок группы «1». Это свидетельствует о том, что меньшие значения подачи способствуют образованию общего заусенца для всего ряда щелей – «юбки». Данное обстоятельство может оказаться чрезвычайно благоприятным для получения структур высокой тонкости фильтрации, так как меньшие значения подачи соответствуют меньшим значениям ширины щелевого зазора (см. вышеприведенную формулу). Кроме того, как было отмечено, щели, находящиеся под «юбкой», отличаются высокой чистотой и отсутствием индивидуальных заусенцев, «юбка» отгибается от щелей механически как единое целое (см. рис. 14), и ее удаление может оказаться более простой задачей, чем удаление индивидуальных заусенцев.

В дальнейшем планируется проверить данные предположения посредством моделирования процесса прорезания щелей и дополнительных экспериментов с различными профилями гофров, а также исследовать возможности удаления «юбок», в частности пропуская мощ-

ного потока фильтрующей среды либо галтовкой.

Наименьшая подача, при которой были получены равномерные щели (с образованием юбки), 0,05 мм/об. Этой подаче согласно вышеприведенной формуле соответствует ширина щелей 19 мкм.

Выводы

В интервале подач 0,2...0,4 мм/об с увеличением глубины резания наблюдается переход от равномерных щелевых структур (область «А») к области нежелательного группирования ребер с увеличением каждой второй или каждой третьей щели (область «В»), причем чем больше подача, тем больше максимальная глубина резания, при которой сохраняются равномерные щели.

В каждой из этих групп отмечено образование заусенцев с внутренней стороны щелей. Заусенцы в щелевом зазоре потенциально ухудшают эксплуатационные характеристики фильтров и создают опасность засорения фильтрата при срыве заусенцев. При меньших подачах (до 0,2 мм/об включительно) при дальнейшем увеличении глубины резания достигается вторая область потенциально пригодных для задач фильтрации структур – область «С», соответствующая образованию общего для всего ряда щелей заусенца – «юбки» на внутренней стороне гофра, при котором щелевая структура вновь становится равномерной. При образовании «юбки» отсутствуют индивидуальные заусенцы для каждой щели, форма щелей более чистая. С уменьшением подачи уменьшается ширина получаемых щелей. При этом наименьшая подача, при которой получены равномерные щели составляет 0,05 мм/об, что соответствует ширине щелей 19 мкм. В дальнейшем планируется провести аналогичные эксперименты с различными материалами при изменении геометрических параметров инструмента для ДР. Установление причин образования «юбок», выбор способа их удаления, а также наблюдаемого эффекта группирования ребер требуют дополнительных исследований.

Список литературы

1. *Tarleton E.S.* Progress in filtration and separation. – Elsevier Science and Technology, 2018. – 698 p. – ISBN 9780081013939. – ISBN 0081013930.
2. *Matanović D., Čikeš M., Moslavac B.* Sand control in well construction and operation. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. – 200 p. – ISBN 978-3-642-25613-4. – DOI: 10.1007/978-3-642-25614-1.
3. Experimental evaluation of metal foam for sand control / F. Deng, X. Li, L. He, Y. Feng // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 176. – P. 1152–1160. – DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.087.
4. *Purchas D., Sutherland K.* Handbook of filter media. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2002. – 572 p. – ISBN 9781856173759.
5. *Kumar J., Galyadav M., Srivastava S.* Performance and backwashing efficiency of screen, disc and sand filters in micro-irrigation systems // *Trends in Biosciences*. – 2017. – Vol. 10 (12). – P. 2172–2178. – URL: http://trendsinbiosciencesjournal.com/upload/13-7477_Jagdish_Kumar.pdf (accessed: 20.10.2021).
6. *Sparks T., Chase G.* Filters and filtration handbook. – 6th ed. – Boston, MA: Elsevier, 2015. – 444 p. – ISBN 9780080993966. – DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.
7. *Tarleton S., Wakeman R.* Solid/liquid separation: scale-up of industrial equipment. – Elsevier Science, 2011. – 743 p. – ISBN 9780080551289.
8. *Perlmutter B.* Solid-liquid filtration: practical guides in chemical engineering. – Elsevier Science, 2015. – 211 p. – ISBN 9780128030547.
9. Solid-liquid separation / ed. by L. Svarovsky. – 4th ed. – Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. – 554 p. – (Chemical Engineering Series). – ISBN 9780750645683.
10. *Smith D., Graciano C., Martínez G.* Expanded metal: A review of manufacturing, applications and structural performance // *Thin-Walled Structures*. – 2021. – Vol. 160. – P. 107371. – DOI: 10.1016/j.tws.2020.107371.
11. *Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г.* Практика прецизионной лазерной обработки. – М.: Техносфера, 2013. – 695 с. – ISBN 9785948363394.
12. *Серебренецкий П.П.* Современные электроэрозионные технологии и оборудование. – СПб.: Лань, 2013. – 351 с. – ISBN 9785811414239.
13. European Patent EP1516150, МКИ F 28 F1/42; B21C37/20. Heat transfer tube and method of and tool for manufacturing the same / P. Thors, N. Zoubkov. – Заявл. 10.06.02; опубл. 23.03.05. – 40 p.
14. *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.
15. *Zubkov N.N., Sleptsov A.D.* Production of slotted polymer tubes by deformational cutting // *Russian Engineering Research*. – 2010. – Vol. 30, N 12. – P. 1231–1233. – DOI: 10.3103/S1068798X10120117.
16. *Zubkov N.N., Sleptsov A.D.* Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 138, iss. 1. – Art. 011007. – DOI: 10.1115/1.4030827.
17. *Zubkov N.N., Vasil'ev V.A.* Filtering elements of a new design and equipment for their manufacture // *Metallurgist*. – 2016. – Vol. 60, N 5–6. – P. 547–554. – DOI: 10.1007/s11015-016-0329-0.
18. *Бузаев Д.А.* Получение щелевых фильтроэлементов на основе металлических труб круглого сечения // *Будущее машиностроения России: однанадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием), 24–27 сентября 2018 г.: сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 15–18.
19. *Паришин С.В.* Процессы и машины для изготовления профильных труб. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. – 356 с. – ISBN 5230064986.
20. *Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G.* Tool-workpiece interaction in deformational cutting // *Russian Engineering Research*. – 2016. – Vol. 36, N 3. – P. 209–212. – DOI: 10.3103/S1068798X16030217.
21. *Зубков Н.Н.* Многофункциональная технология увеличения площади поверхности для повышения теплообменных и технологических свойств деталей // *Полет*. – 2003. – № 3. – С. 41–46.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Influence of the parameters of deforming cutting on the features of the resulting slotted filter structures

Dmitry Buzaev ^{a,*}, Nikolay Zubkov ^b

Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7258-7379>,  dm.buzaev@bmstu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-3757-1299>,  zoubkovn@bmstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 August 2021

Revised: 31 August 2021

Accepted: 16 October 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Filters
 Filtration
 Solid-liquid separation
 Filtering tubes
 Slot filters
 Regenerating filters
 Deforming cutting

ABSTRACT

Introduction. Slot filters are in demand in petrochemical, machine-building, food, mining and other industries. *DC* is an edge cutting machining method based on undercutting and plastic deformation of the workpiece's surface layer without its removal in the form of chip. *DC* stands out from the other slot structure forming methods for its capability of obtaining fine filters (slot width upwards of 20 μm) while maintaining relatively high productivity rate and being waste-free. Nevertheless, patterns of through slots cutting by means of *DC* had virtually not been investigated previously. **The purpose of the work** is to establish the influence of the main parameters of deformational cutting, namely feed and depth of cut, on features of through slots obtained, as well as identifying combinations of parameters that ensure the production of structures suitable for filtration. **Method of investigation** consisted of experiments on through-cutting of corrugations stamped on copper strips and a visual analysis of the structures obtained. Cutting through the corrugations by *DC* was conducted on a lathe while using a special attachment – a barrel which workpiece corrugated strips were wrapped around and fixed on with tension. **Results and discussion.** The resulting typical structures obtained under different combinations of depth of cut and feed are systemized and divided into the following groups: “0” – the absence of the through cut; “1” – uniform slots; “2” – “twinning” (pairwise convergence of slot walls), “3” – stripping of every second slot wall; “4” – non-regular or complete stripping of slot walls; “5” – uniform slots with a continuous burr (“skirt”) formed along the slot row on the internal side of the corrugation; “6” – uniform slots with a “skirt” opened incompletely. In the range of feeds 0.2 ... 0.4 mm/rev with increasing cutting depth, there is a transition from structures of group “1” to structures of group “2”, and the greater the feed, the greater the maximum depth of cut, at which uniform slots remain. Group “1” is assigned to the area of structures suitable for filtration applications, although it is characterized by the formation of individual burrs on the inner side of each slot. At lower feeds (up to 0.2 mm/rev) with further increase of the depth of cut another group of structures potentially suitable for filtering purposes is reached: groups “5” and “6”. With the “skirt” formed, individual burrs next to each slots are absent, and the shape of slots is cleaner. With a decrease in feed, the width of the resulting slots decreases. The least tool feed value, at which uniform slots are obtained, is 0.05 mm/rev which corresponds to 19 μm slot width. Establishing the causes of “twinning” and the formation of “skirts” requires further investigation.

For citation: Buzaev D.A., Zubkov N.N. Influence of the parameters of deforming cutting on the features of the resulting slotted filter structures. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 33–46. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-33-46. (In Russian).

References

1. Tarleton E.S. *Progress in filtration and separation*. Elsevier Science and Technology, 2018. 698 p. ISBN 9780081013939. ISBN 0081013930.
2. Matanović D., Čikeš M., Moslavac B. *Sand control in well construction and operation*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012. 200 p. ISBN 9783642256134. DOI: 10.1007/978-3-642-25614-1.
3. Deng F., Li X., He L., Feng Y. Experimental evaluation of metal foam for sand control. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 176, pp. 1152–1160. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.087.

* Corresponding author

Buzaev Dmitry A., Assistant
 Bauman Moscow State Technical University,
 5 2nd Baumanskaya Str.,
 105005, Moscow, Russian Federation
 Tel.: +7 (903) 679-96-59, e-mail: dm.buzaev@bmstu.ru

4. Purchas D., Sutherland K. *Handbook of filter media*. 2nd ed. Oxford, Elsevier Advanced Technology, 2002. 572 p. ISBN 9781856173759.
5. Kumar J., Galyadav M., Srivastava S. Performance and backwashing efficiency of screen, disc and sand filters in micro-irrigation systems. *Trends in Biosciences*, 2017, vol. 10 (12), pp. 2172–2178. Available at: [http://trendsinsciencesjournal.com/upload/13-7477_\(Jagdish_Kumar\).pdf](http://trendsinsciencesjournal.com/upload/13-7477_(Jagdish_Kumar).pdf) (accessed 20.10.2021).
6. Sparks T., Chase G. *Filters and filtration handbook*. 6th ed. Boston, MA, Elsevier, 2015. 444 p. ISBN 978-0-08-099396-6. DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.
7. Tarleton S., Wakeman R. *Solid/liquid separation: scale-up of industrial equipment*. Elsevier Science, 2011. 743 p. ISBN 9780080551289.
8. Perlmutter B. *Solid-liquid filtration: practical guides in chemical engineering*. Elsevier Science, 2015. 211 p. ISBN 9780128030547.
9. Svarovsky L., ed. *Solid-Liquid Separation*. 4th ed. *Chemical Engineering Series*. Oxford, Boston, Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p. ISBN 9780750645683.
10. Smith D., Graciano C., Martínez G. Expanded metal: A review of manufacturing, applications and structural performance. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 160, p. 107371. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107371.
11. Vaks E.D., Milen'kii M.N., Saprykin L.G. *Praktika pretsizionnoi lazernoi obrabotki* [Practice of precision laser treatment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013. 695 p. ISBN 9785948363394.
12. Serebrenitskii P.P. *Sovremennyye elektroerozionnyye tekhnologii i oborudovanie* [Modern electrical discharge technologies and equipment]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013. 351 p. ISBN 9785811414239.
13. Thors P., Zoubkov N. *Heat transfer tube and method of and tool for manufacturing the same*. European Patent, no. EP1516150, 2005.
14. Zubkov N.N. Rastyazhnye titanovye setki na osnove deformiruyushchego rezaniya [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.
15. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of slotted polymer tubes by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233. DOI: 10.3103/S1068798X10120117.
16. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, vol. 138, iss. 1, art. 011007. DOI: 10.1115/1.4030827.
17. Zubkov N.N., Vasil'ev V.A. Filtering elements of a new design and equipment for their manufacture. *Metallurgist*, 2016, vol. 60, no. 5–6, pp. 547–554. DOI: 10.1007/s11015-016-0329-0.
18. Buzaev D.A. [Obtaining of slot-type filtering elements from metal pipes of circular section]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii: odinnadtsataya vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Proceedings 11th All-Russian conference of young scientists and specialists “Future of mechanical engineering of Russia”], 24–27 September 2018. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018, pp. 15–18. (In Russian).
19. Parshin S.V. *Protsessy i mashiny dlya izgotovleniya profil'nykh trub* [Processes and machines for profile tubes production]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 2006. 356 p. ISBN 5230064986.
20. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool–workpiece interaction in deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 209–212. DOI: 10.3103/S1068798X16030217.
21. Zubkov N.N. Mnogofunktsional'naya tekhnologiya uvelicheniya ploshchadi poverkhnosti dlya povysheniya teploobmennyykh i tekhnologicheskikh svoystv detalei [A multifunctional technology of the surface area increase to improve heat exchange and technological properties of parts]. *Polet = Polyot*, 2003, no. 3, pp. 41–46.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка–инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей

Атул Кулкарни^{1, а}, Сатиш Чинчаникар^{1, b, *}, Викас Саргаде^{2, c}

¹ Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, Махараштра, Индия

² Технологический университет им. доктора Бабасахеба Амбедкара, Видьявихар, Лонере, округ Райгад - 402103, Махараштра, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>,  atul.kulkarni@viit.ac.in, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchanikar@viit.ac.in,

^с  <https://orcid.org/0000-0001-8855-112X>, vgsargade@dbatu.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 29 июля 2021

Рецензирование: 19 августа 2021

Принята к печати: 07 сентября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Температуры поверхности стружка-инструмент

Теория размерностей

Искусственная нейронная сеть

Инструменты с покрытием

SS304

АННОТАЦИЯ

Введение. Во время механической обработки результирующая температура оказывает более широкое и критическое влияние на производительность обработки. Во время обработки потребляемая мощность в основном преобразуется в тепло вблизи режущей кромки инструмента. Почти вся работа, выполняемая при пластической деформации, превращается в тепло. Исследователи приложили много усилий для измерения температуры резания во время обработки, поскольку это существенно влияет на срок службы инструмента и общую производительность обработки. **Цель работы:** исследовать температуру на поверхности раздела стружка–инструмент с учетом влияния параметров резания и типа покрытия инструмента при точении SS304. Температура на границе раздела стружка–инструмент измеряется путем изменения скорости резания и подачи при постоянной глубине резания твердосплавными инструментами без покрытия; с однослойным покрытием TiAlN и многослойным покрытием TiN/TiAlN, нанесенными методом осаждения паров (PVD). Кроме того, предпринята попытка разработать модель для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент с использованием размерного анализа и моделирования на основе ИНС для лучшего понимания процесса. **Методы исследования.** Эксперименты проводили при изменении скорости резания (140...260 м/мин) и подачи (0,08...0,2 мм/об), но при сохранении постоянной глубины резания, равной 1 мм. Температуру на границе раздела стружка–инструмент измеряли с использованием принципа термомпары для обработки инструмента. *Калибровочная установка (Calibration Setup)* предназначена для установления взаимосвязи между создаваемой электродвижущей силой (ЭДС) и температурой резания во время обработки. Для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент был проведен статистический размерный анализ и построена модель на основе искусственных нейронных сетей. Тангенциальная сила резания и характеристики стружки, такие как ширина и толщина, также измерялись при различных условиях резания, что является необходимым при моделировании размерного анализа. **Результаты и их обсуждение.** Твердосплавный инструмент с PVD-покрытием из TiAlN имел более низкую температуру на границе раздела стружка–инструмент, чем инструмент с покрытием из TiN/TiAlN. Было замечено, что температура на границе раздела стружка–инструмент заметно возрастает с увеличением скорости резания, площадью поперечного сечения стружки и удельного давления резания. Однако меньшая сила резания наблюдалась при использовании твердосплавного инструмента с многослойным покрытием TiN/TiAlN, что можно объяснить более низким коэффициентом трения, создаваемым передней поверхностью этого инструмента для стекающей стружки. Вместе с тем наибольшая сила резания наблюдалась при использовании твердосплавного инструмента без покрытия. Было отмечено, что разработанные модели позволяют прогнозировать температуру на границе стружка–инструмент с абсолютной погрешностью 5%. Однако наименьшая средняя абсолютная погрешность в 0,78% наблюдалась в модели, построенной с использованием ИНС и, следовательно, может быть надежно использована для прогнозирования температуры интерфейса стружка–инструмент во время точения SS304.

Для цитирования: Кулкарни А.П., Чинчаникар С., Саргаде В.Г. Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка–инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, к.т.н., профессор

Институт информационных технологий Вишвакармы,

Кондва (Бадрек), Пуне - 411048, Махараштра, Индия

Тел.: 91-2026950441, e-mail: satish.chinchanikar@viit.ac.in

Введение

Аустенитная нержавеющая сталь – наиболее часто используемая немагнитная сталь, относится к категории труднообрабатываемых материалов. Это связано с тенденцией к образованию длинной, липкой и волокнистой стружки, а также к образованию наростов во время обработки резанием, что снижает стойкость инструмента и снижает качество обработки поверхности. Выбор материала режущего инструмента, его геометрии и условий резания играет важную роль при обработке этих сталей.

Исследователи наблюдали более высокую температуру поверхности раздела стружка–инструмент при использовании инструментов без покрытия, с покрытием из TiC/TiN и TiC/Al₂O₃/TiN. Было замечено, что температура поверхности раздела быстро возрастает с увеличением подачи и скорости резания. Однако повышение температуры резания ускоряет износ инструмента и существенно влияет на его стойкость [1, 2]. *Pal* с соавторами [3] разработали математическую модель для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент. Их исследование показало, что скорость и глубина резания в наибольшей степени определяют температуру поверхности раздела. *Abhang* с соавторами [4] обнаружили термоэлектрическую взаимосвязь между режущим инструментом и рабочим материалом. Их исследование показало, что скорость резания и подача оказывают заметное влияние на температуру резания во время токарной обработки стали EN-31.

Alvelid [5] использовал принцип метода инструментальной термопары. Автор выполнил калибровку, используя прямой нагрев калибровочного материала с помощью электрического тока через резистивный элемент или индукционную катушку, которые были помещены напротив точки контакта двух материалов. Его исследование показало, что термоэлектрический потенциал существенно зависит от скорости нагрева и охлаждения. *Chinchanikar* и *Choudhury* [6] также разработали математическую модель для прогнозирования средней температуры на границе раздела стружка–инструмент на основе экспериментальных наблюдений. Их исследование коррелировало ЭДС (электродвижущую силу) с температурой на поверхности раздела, основан-

ную на принципе инструментальной термопары, а также показало, что скорость резания, подача и глубина резания практически не влияют на температуру поверхности раздела. В другом исследовании [7] они обнаружили более высокую температуру поверхности раздела для более твердого рабочего материала, чем для мягкого.

Panneerselvam с соавторами [8] исследовали температуру границы раздела стружки и инструмента для режущих инструментов, изготовленных методом порошковой металлургии. Их исследование показало, что скорость резания существенно влияет на температуру поверхности раздела. *Vapat* с соавторами [9] разработали численную модель, позволяющую получить распределение температуры при точении закаленной стали *AISI 52100*. Модель распределения температуры как функция тепловыделения была разработана с использованием модуля *ABAQUS explicit* и с произвольным лагранжево–эйлеровым (*ALE*) подходом. Было доказано, что температура резания увеличивается с увеличением скорости резания. Результаты моделирования распределения температуры соответствовали результатам, имеющимся в литературе.

Dhar с соавторами [10] сообщили о быстром повышении шероховатости поверхности из-за роста температуры резания и напряжения на вершине инструмента. Инструментальная термопара использовалась для измерения температуры на границе раздела стружка–инструмент. *Anagonye* с соавторами [11] выполнили калибровку инструмента и рабочих материалов с кислородно-ацетиленовой горелкой, которая использовалась в качестве источника нагрева при реализации принципа на основе инструментальной термопары. В их исследовании наблюдалось снижение температуры резания при увеличении угла наклона и радиуса при вершине пластины из-за наличия большей площади для отвода тепла.

Из рассмотренной выше литературы следует, что параметры резания, особенно скорость резания и подача, существенно влияют на температуру поверхности раздела стружка–инструмент. В большинстве исследований были предприняты попытки измерить температуру резания во время обработки с использованием метода инструментальной термопары. Однако очень мало работ по исследованию температуры резания с

учетом влияния параметров резания и типа покрытия инструмента при точении *SS304*. Более того, очень мало попыток моделирования температуры резания с использованием анализа размерностей и искусственных нейронных сетей. В соответствии с вышеуказанными фактами в настоящей работе исследуется температура на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки *SS304* твердосплавными инструментами без покрытия, а также с однослойными TiAlN и многослойным TiN/TiAlN PVD-покрытиями. Кроме того, чтобы лучше понять процесс, была предпринята попытка разработать модель для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент с использованием анализа размерностей и моделирования на основе искусственных нейронных сетей.

Методика исследований

В настоящей работе температура поверхности раздела стружка–инструмент была исследована во время токарной обработки заготовки из нержавеющей стали *SS304* диаметром 90 мм и длиной 300 мм с использованием твердосплавных инструментов без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN PVD-покрытиями. Технические характеристики ISO пластины без покрытия и державки, использованные в настоящем исследовании, приведены в табл. 1. Радиус при вершине

выбранной режущей пластины составил 0,8 мм, а радиус кромки пластины – приблизительно 20 мкм. Токарные эксперименты проводились на токарном станке с ЧПУ. Температура поверхности раздела стружка–инструмент была исследована при сухом точении при скоростях резания 140, 200 и 240 м/мин, подаче 0,08; 0,14; 0,2 и 0,26 мм/об и постоянной глубине резания 1 мм. Параметры резания были выбраны на основе обзора литературы, возможностей станка и рекомендаций производителя режущего инструмента.

При механической обработке возникающая температура имеет более обширное и критическое влияние на производительность обработки. Во время обработки потребляемая мощность в основном преобразуется в тепло вблизи режущей кромки инструмента, и почти вся работа, выполняемая во время пластической деформации, преобразуется в тепло. В настоящем исследовании закон принципа термоэлектричества (эффекта Зеебека) был использован для корреляции разницы температур между горячим и холодным спаем двух разнородных материалов с генерируемой электродвижущей силой (ЭДС). Однако присутствие третьего материала было бы нежелательным, так как он может изменить конечный результат из-за образования паразитной ЭДС на втором переходе. Поскольку это изменяет конечный результат, необходимо принять

Таблица 1

Table 1

Технические характеристики ISO пластины и державки

The ISO specifications of cutting insert and tool holder

Характеристика / Particulars	Значение / Details
Обозначение режущей пластины по стандарту ISO / ISO designation of cutting insert	CNMG120408 (MG-MS)
Прилежащий угол (угол профиля) / Including angle	80°
Передний угол / Rake angle	-6°
Задний угол / Clearance angle	5°
Угол в плане / Approach angle	95°
Обозначение державки по стандарту ISO / ISO designation of tool holder	PCLNL2525M12

меры для его устранения. Поэтому изоляция материала заготовки/инструмента играет важную роль в получении точных результатов с помощью метода инструментальной термопары.

Изначально заготовка зажималась с помощью патрона и поддерживалась центром задней бабки во время обработки. Поэтому были приняты меры для того, чтобы изолировать заготовку от кулачков патрона. Заготовка была изолирована с помощью специальной тефлоновой ленты и втулки, как показано на рис. 1. Кроме того, давление зажимных губок было отрегулировано и поддерживалось на оптимальном уровне для предотвращения проникновения губок через изоляцию. После изоляции заготовки с одного конца, т. е. от патрона, необходимо было изолировать заготовку от задней бабки, чтобы полностью изолировать заготовку от корпуса станка. В связи с этим вращающийся центр был покрыт эпоксидным гелевым покрытием и использованы тефлоновые изоляционные заглушки (заглушки из непроводящего материала). Поскольку державка находится в прямом контакте с револьверной головкой и в конечном итоге с корпусом станка, на различные части державки, которые непосредственно контактируют с режущим инструментом (регулирующая шайба, L-образный рычаг, уплотняющая пластинка и корпус хвостовика) было нанесено эпоксидно-полиэфирное покрытие толщиной 20 мкм.

Соединение инструмента и детали во время обработки рассматривалось как горячий спай, в то время как угольная щетка, касающаяся детали, отождествляла холодный спай, как показано на рис. 2. Соединительные провода от инструмента были выведены через небольшое отверстие, предусмотренное на хвостовике державки. Угольная щетка использовалась для подключения проводов вращающейся детали. Специальная подставка и подпружиненный держатель были спроектированы и изготовлены для поддержания равномерного и прочного контакта между угольной щеткой и заготовкой, как показано на рис. 2.

Один конец медной проволоки помещали между режущей пластиной и державкой, а другой конец подсоединяли к вольтметру. Один дополнительный медный провод использовался для замыкания электрической цепи. Один конец провода был прикреплен к угольной щетке, а другой – к вольтметру. Для соединения использовалась медная проволока диаметром 1 мм, и ее длина поддерживалась постоянной во время экспериментов и калибровки.

Калибровочная установка была разработана для установления взаимосвязи между производимой ЭДС и температурой резания во время обработки. Спай инструментальной термопары был построен с использованием длинной непрерывной стружки и пластины из карбида

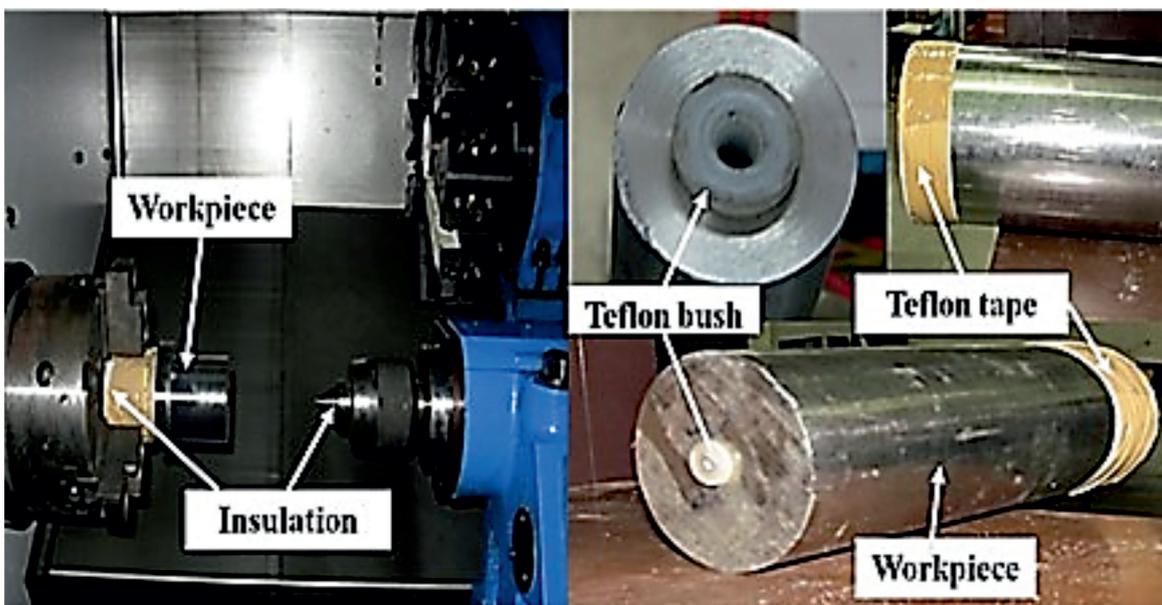


Рис. 1. Изоляция заготовки вставленными заглушками

Fig. 1. Insulation of the workpiece with the inserted plugs

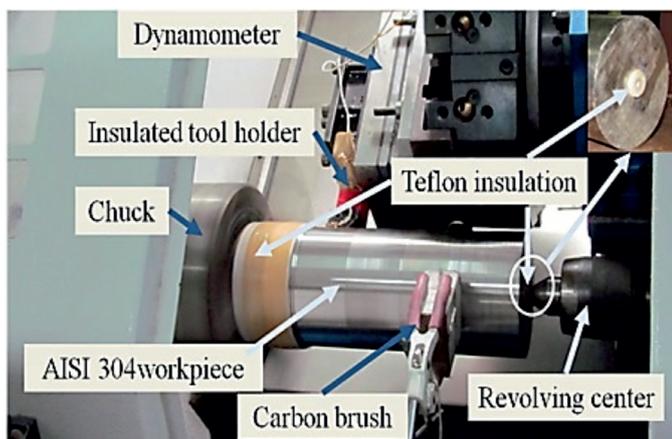


Рис. 2. Установка с инструментальной термопарой
Fig. 2. Tool-work thermocouple machining setup

вольфрама. Электрический воздушнонагреватель использовался в качестве нагревательного элемента для соединения рабочего инструмента. Он имитировал тепловые явления при механической обработке. В литературе сообщается, что температура калибровки должна быть больше половины точки плавления рабочего материала (температура плавления *SS304*: 1453 °C) [1, 2]. Поэтому был выбран электрический воздушнонагреватель из материала инконель мощностью 2 кВт, который может создавать температуру 1000 °C в раскаленных условиях. На стыке заготовки и вставки устанавливалась стандартная проволока для термопары алюмель-хромель.

Для калибровки температуры на границе раздела стружка–инструмент калибруемый материал заготовки и инструмента сначала зажимался для обеспечения надлежащего контакта между ними. Затем один конец медного провода подсоединяли к инструменту и заготовке, а другой конец – к клеммам вольтметра. Далее электрический воздушнонагреватель был приведен в контакт с точкой соединения для нагрева этой самой точки. Стандартная термопара типа К (хромель–алюмель) удерживалась на стыке рабочего инструмента и подключалась к индикатору температуры. Вся сборка размещалась в контейнере, изолированном стекловолокном для уменьшения тепловых потерь. После включения электрического нагревателя происходил постепенный нагрев точки соединения до 1000 °C с одновременной регистрацией соответствующей ЭДС. Калибровочная кривая для комбинации твердосплавных инструментов без

покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями и рабочего материала *SS304* показана на рис. 3.

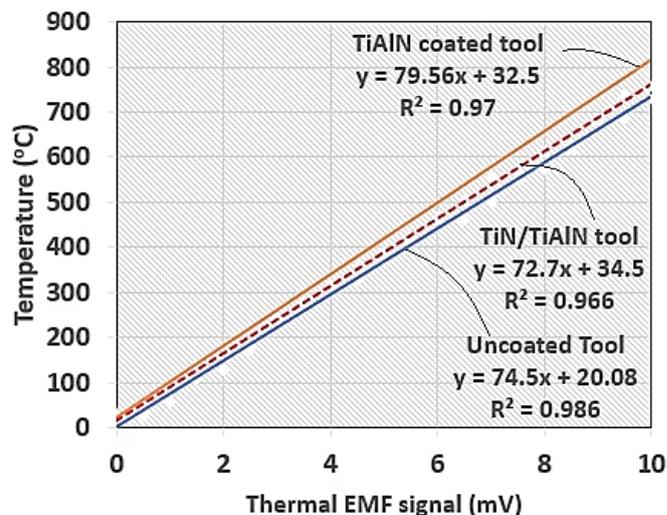


Рис. 3. Калибровочная кривая для инструментов без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями

Fig. 3. Calibration curves for uncoated and *PVD* single-layer TiAlN and multi-layer TiN/TiAlN coated carbide tools

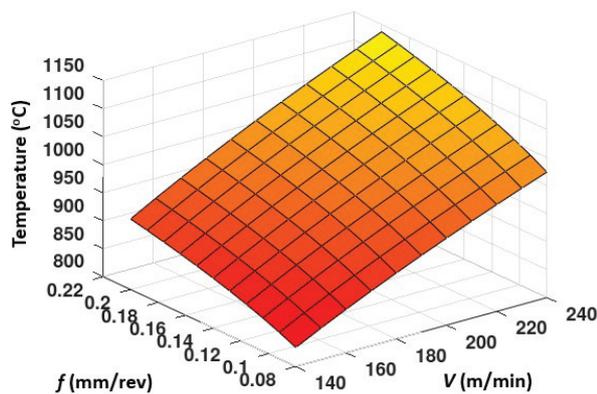
Результаты и их обсуждение

Большое количество исследований во всем мире направлены на улучшение обрабатываемости *SS304*. В табл. 2 показаны экспериментальные результаты измерения температур резания во время сухого точения стали *SS304* инструментами без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями при различных режимах резания. На рис. 4 показано влияние скорости резания и подачи на температуру резания твердосплавными инструментами без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями.

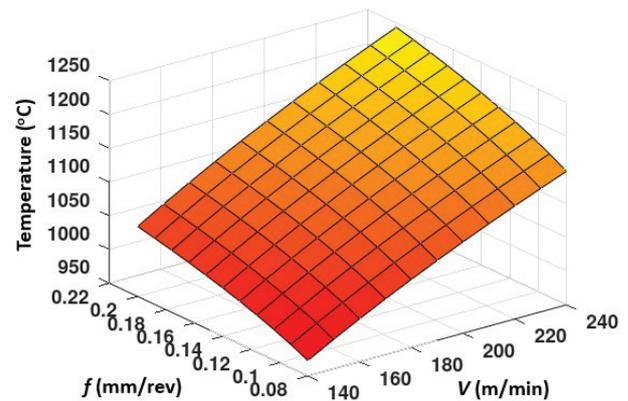
В последние годы исследователи уделяют значительное внимание разработке прогнозных моделей для измерения производительности во время обработки. В настоящей работе для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент разработаны модели на основе статистического анализа, анализа размерностей и искусственной нейронной сети. Графики поверхности построены для лучшего понимания влияния параметров процесса на температуру резания. Значения коэффициентов, задействованных в статистических моделях для различных инструментов, были рассчитаны

**Изменение температуры резания для различных инструментов
 в зависимости от условий резания**
Cutting temperature for different tools varying with cutting conditions

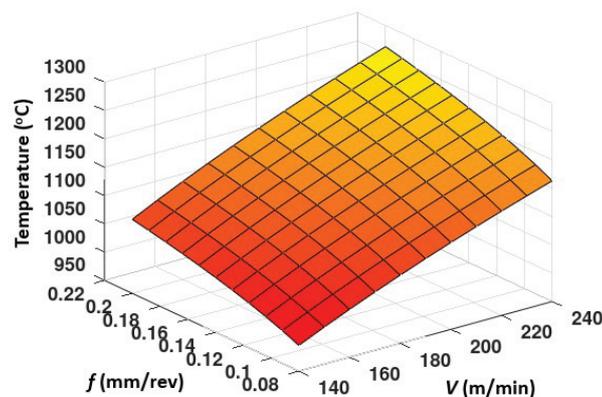
Эксперимент № / Expt. no.	Скорость резания (м/мин) / Cutting speed (m/min)	Подача (мм/об) / Feed (mm/rev)	Температура на границе раздела стружка– инструмент / Chip-tool interface temperature		
			Пластина без покрытия / Uncoated	Пластина с TiAlN покрытием / TiAlN coated	Пластина с TiN/TiAlN покрытием / TiN/TiAlN coated
1	140	0,08	825	930	996
2	140	0,14	900	1039	1047
3	140	0,2	939	1041	1081
4	200	0,08	933	1109	1104
5	200	0,14	1029	1169	1161
6	200	0,2	1039	1200	1199
7	260	0,08	1078	1186	1191
8	260	0,14	1120	1204	1252
9	260	0,2	1175	1257	1293



а



б



в

Рис. 4. Температура резания для инструмента без покрытия (а); для инструмента
 с TiAlN-покрытием (б); для инструмента с TiN/TiAlN-покрытием (в)

Fig. 4. Cutting temperature for (a) Uncoated; (б) TiAlN coated; (в) TiN/TiAlN coated tool

методом регрессии с использованием программного обеспечения *Data-fit*. Значения *R*-квадрата для всех разработанных статистических моделей выше 0,9 (табл. 3) показывают, что разработанные модели могут быть надежно использованы для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки *SS304* для данной комбинации инструмента и заготовки.

Чтобы иметь четкое представление о влиянии входных параметров на температуру резания, построены трехмерные (3D) поверхностные диаграммы путем изменения параметров процесса для инструментов без покрытия и с *PVD*-покрытием. Диаграммы построены с использованием разработанных эмпирических уравнений. На рис. 4 показаны трехмерные поверхностные диаграммы температуры резания во время токарной обработки *SS304* для различных инструментов, построенные с использованием формул (1)–(3).

Из рис. 4, *a*, *b* и *в* видно, что температура резания увеличивается с увеличением скорости резания и подачи. Повышение температуры резания более заметно при увеличении скорости резания, сопровождаемой подачей. Однако этот эффект проявляется в большей степени при использовании твердосплавного инструмента без покрытия, за которым следует твердосплавный инструмент с *TiAlN*-покрытием. Это также может быть подтверждено более высоким положительным значением экспоненты для скорости резания, за которым следует подача по формулам (1)–(3).

Самая низкая температура резания, наблюдаемая для твердосплавного инструмента без покрытия, показывает, что максимальное количество тепла проникало в режущий инструмент от передней поверхности. Однако более высокая температура поверхности раздела, наблюдаемая при использовании инструментов с покрытием, показывает, что покрытия способствуют меньшему проникновению тепла в основание инструмента. Вместе с тем среди инструментов с покрытием самая низкая температура поверхности раздела стружка–инструмент наблюдалась у твердосплавного инструмента с *TiAlN PVD*-покрытием, чем у инструмента с покрытием *TiN/TiAlN*. Это также может быть подтверждено более высоким значением теплопроводности твердосплавного инструмента без покрытия, за которым следует покрытие *TiAlN* и покрытие *TiN/TiAlN*. Теплопроводность инструмента без покрытия, а также с *TiAlN* и *TiN/TiAlN PVD*-покрытием составляет 80 Вт/м · К, 6,7 Вт/м · К и 5,1 Вт/м · К соответственно [12–14]. Несмотря на то что теплопроводность увеличивается в зависимости от температуры, при высоких температурах теплопроводность инструмента с покрытием остается ниже, чем у инструмента без покрытия [12]. Следовательно, тепло, проводимое в инструменте во время обработки твердосплавным инструментом без покрытия, больше по сравнению с инструментами с *TiAlN*- и *TiN/TiAlN*-покрытиями. Следовательно, температура твердосплавного инструмента без покрытия ниже, чем у инструмента с покрытием. Эти

Таблица 3

Table 3

Статистические модели для прогнозирования температуры резания
Statistical-based models to predict cutting temperature

Тип инструмента / Type of tool	Статистические модели / Statistical-based models	<i>R</i> -квадрат / <i>R</i> -squared	Номер уравнения / Eq. no.
Твердосплавный без покрытия / Uncoated carbide	$T = 169,0517V^{0,3814} f^{0,01144}$	0,98	(1)
Твердосплавный с <i>TiAlN PVD</i> -покрытием / <i>PVD</i> -coated <i>TiAlN</i> carbide tool	$T = 265,5113V^{0,3074} f^{0,0874}$	0,93	(2)
Твердосплавный с <i>TiN/TiAlN PVD</i> -покрытием / <i>PVD</i> -coated <i>TiN/TiAlN</i> carbide tool	$T = 299,4988V^{0,2889} f^{0,0897}$	0,99	(3)

результаты соответствуют результатам, полученным Grzesik [4, 13, 15].

Повышение температуры резания, заметно увеличивающееся со скоростью резания, можно объяснить увеличением удельной энергии резания. Удельную энергию резания можно разделить на два основных компонента: энергию сдвига и энергию трения. Энергия сдвига и энергия трения прямо пропорциональны скорости сдвига и скорости стружки соответственно [16]. Следовательно, увеличение скорости резания напрямую отражается на увеличении энергии и, следовательно, температуры резания. Кроме того, было замечено, что структура покрытия в значительной степени влияет на температуру резания. Более того, было замечено, что инструмент без покрытия изнашивается быстрее по сравнению с инструментами с покрытием, в результате чего увеличивается площадь контакта стружки с инструментом, что приводит к большей проводимости тепла к области инструмента. В то же время в случае инструментов с покрытием более высокая износостойкость покрытий ограничивает износ и, следовательно, площадь контакта стружки с инструментом и позволяет отводить больше тепла со стекающей стружкой. Более высокая теплопроводность инструмента без покрытия снижает его жаропрочность, что приводит к более раннему выходу инструмента из строя [17].

Проблемы, связанные с измерением температуры, привели исследователей к разработке математических моделей для прогнозирования температур во время механической обработки. В ходе достаточно большого количества исследований была предпринята попытка предсказать температуру резания с использованием статистических моделей. Математические модели, разработанные Boothroyd, Shaw и Rapier, также широко использовались исследователями для прогнозирования температуры резания. В этом разделе обсуждается моделирование с использованием анализа размерностей и искусственной нейронной сети для прогнозирования температуры на поверхности раздела стружка–инструмент при работе с твердосплавными инструментами без покрытия, с однослойным TiAlN-покрытием и с многослойным TiN/TiAlN-покрытием.

Анализ размерностей температуры резания

При анализе размерностей все независимые переменные записываются в виде их безразмерных комбинаций. Эти независимые безразмерные переменные могут быть определены на основе предварительных знаний, рассуждений или экспериментов. Значения констант получены из экспериментальных данных [18, 19]. В настоящей работе анализ размеров проводится для разработки математической модели с целью получения значений температуры резания во время токарной обработки стали SS304 с использованием инструментов без покрытия и инструментов с TiAlN-покрытием. Эти соотношения построены на основе экспериментальных данных. Физические величины, выбранные для анализа размеров, приведены в табл. 4.

Первоначально выбираются четыре часто используемых единицы: M (масса), L (длина), T (время) и θ (температура). Это важный этап, на котором следует выбрать наиболее важные переменные, влияющие на температуру резания. Предполагалось, что около 80...85 % тепла рассеивается вместе со стружкой, и, следовательно, теплопроводность инструмента не включена в настоящий анализ. Переменные, выбранные для анализа, приведены в табл. 4. Количество основных величин – четыре, а количество физических величин, выбранных в настоящем исследовании, – шесть. Согласно пи-теореме Buckingham, количество безразмерных групп, необходимых для корреляции всех этих величин, будет равно разнице между количеством физических величин и фундаментальными величинами, которая равна двум в настоящем исследовании.

Затем четыре основные переменные из шести физических величин выбираются таким образом, чтобы они не образовывали сами по себе безразмерной группы. Эти переменные – V_c , S_p , k и ρC . Одна неосновная величина группируется со всеми четырьмя основными переменными, чтобы получить одно безразмерное число. Пусть Q_1 и Q_2 – две безразмерные группы, которые выражаются следующим образом:

$$Q_1 = (V_c)^a (S_p)^b k^c (\rho C)^d \theta, \quad (4)$$

$$Q_2 = (V_c)^e (S_p)^f k^g (\rho C)^h A_0. \quad (5)$$

Физические величины вместе с размерной формулой
Physical quantities along with dimensional formula

Физическая величина / Physical quantity	Обозначение / Symbol	Размерная формула / Dimensional formula
Температура (°C) / Temperature (degree Celsius)	Θ	D
Скорость резания (м/мин) / Cutting speed (m/min)	V_c	$L T^{-1}$
Поперечное сечение стружки (м ²) / Chip cross-sectional area (m ²)	A_0	L^2
Удельное давление резания (Н/м ²) / Specific cutting pressure (N/m ²)	S_p	$M L^{-1} T^{-2}$
Теплопроводность рабочего материала (Вт/м · К) / Thermal conductivity of work material (W/m · K)	k	$M L T^{-3} D^{-1}$
Объемная удельная теплоемкость рабочего материала (произведение плотности (ρ) на удельную теплоемкость рабочего материала (C)) ([кг/м ³][Дж/кг · К]) / Volumetric specific heat of work material (a product of density (ρ) and specific heat of work material (C)) ([kg/m ³][J/kg · K])	ρC	$M L^{-1} T^{-2} D^{-1}$

С точки зрения фундаментальных измерений уравнения (4) и (5) можно записать следующим образом:

$$Q_1 = (L^a T^{-a})(M^b L^{-b} T^{-2b})(M^c L^c T^{3c} D^{-c}) \times \\ \times (M^d L^{-d} T^{-2d} D^{-d}) D, \quad (6)$$

$$Q_2 = (L^e T^{-e})(M^f L^{-f} T^{-2f})(M^g L^g T^{3g} D^{-g}) \times \\ \times (M^h L^{-d-h} T^{-2h} D^{-h}) L^2. \quad (7)$$

Поскольку Q_1 и Q_2 являются безразмерными величинами, индекс для каждого члена должен быть равен нулю. Следовательно, приравнявая индекс для каждого члена к нулю и решая уравнения одновременно, мы получаем, что $a = 0$, $b = -1$, $c = 0$, $d = 1$, $e = 2$, $f = 0$, $g = -2$ и $h = 2$. Подставляя эти значения констант в уравнения (6) и (7), получаем:

$$Q_1 = (\rho C \theta / S_p), \quad (8)$$

$$Q_2 = (V_c^2 (\rho C)^2 A_0) / k^2. \quad (9)$$

Выразим температуру на поверхности раздела стружка–инструмент как функцию двух безразмерных групп Q_1 и Q_2 , которые включают зависимую переменную θ . Уравнение температуры резания с использованием анализа размерностей (уравнения (8) и (9)) может быть записано следующим образом:

$$\theta = C_0 (S_p / \rho C)^m \left((V_c^2 (\rho C)^2 A_0) / k^2 \right)^n, \quad (10)$$

где C_0 , m , n – константы, а их значения определены на основании экспериментальных результатов. Уравнение (10) можно использовать для определения температуры резания во время токарной обработки стали SS304 с использованием как пластин без покрытия, так и пластин с покрытием. Значения констант в формуле (10) получены с использованием экспериментальных результатов температуры резания (см. табл. 2) и знания силы резания, толщины стружки и ширины стружки для данных условий резания (табл. 5).

Объемная удельная теплоемкость рабочего материала (ρC) и теплопроводность (k) рабочего материала (при 500 °C) упоминаются в

Сила резания, толщина стружки и ширина стружки при условиях резания, указанных в табл. 2

The cutting force, chip thickness, and chip width at cutting conditions stated in Table 2

Экспе- римент № / Expt. no.	Инструмент без покрытия / Uncoated tool			Инструмент с TiAlN- покрытием / TiAlN coated tool			Инструмент с TiN/TiAlN- покрытием / TiN/TiAlN coated tool		
	F_c (Н)	a_c (мм)	a_w (мм)	F_c (Н)	a_c (мм)	a_w (мм)	F_c (Н)	a_c (мм)	a_w (мм)
1	410	0,287	1,64	354	0,3	1,5	329	0,24	1,47
2	630	0,370	1,86	536	0,32	1,8	460	0,3	1,73
3	702	0,480	1,9	610	0,35	1,83	570	0,37	1,77
4	387	0,260	1,72	318	0,28	1,663	321	0,22	1,59
5	554	0,360	1,87	498	0,3	1,76	448	0,28	1,72
6	636	0,473	1,92	582	0,33	1,83	555	0,35	1,78
7	365	0,200	1,87	366	0,27	1,646	315	0,19	1,66
8	501	0,330	1,86	512	0,29	1,733	440	0,26	1,7
9	630	0,467	1,92	556	0,315	1,84	545	0,34	1,78

литературе и рассматриваются как 502 Дж/кг · К и 21,5 Вт/м · К. A_0 – это площадь поперечного сечения стружки, которая рассчитывается как произведение толщины стружки (a_c) и ширины стружки (a_w) для данных условий резания. Удельное давление резания (S_p) получается делением силы резания (F_c) на произведение подачи и глубины резания. Тангенциальное усилие резания (F_c) измеряли измерителем силы резания типа *Kister-9257B*, а среднюю ширину стружки и толщину стружки – с помощью цифрового микрометра. Полученные значения констант: $C_0 = 1,24$, $m = 0,154$ и $n = 0,226$ для твердосплавного инструмента без покрытия и $C_0 = 1,97$ и $6,63$, $m = 0,083$ и $0,0432$, $n = 0,169$ и $0,1605$ для твердосплавных инструментов с покрытием TiAlN и TiN/TiAlN соответственно. Подставив эти значения в уравнение (10) можно получить окончательные уравнения для прогнозирования температуры резания твердосплавными инструментами без покрытия, а также с TiAlN- и TiN/TiAlN-покрытиями соответственно:

для твердосплавного инструмента без покрытия,

$$\theta = 28,5636 S_p^{0,154} V^{0,452} A_0^{0,226}; \quad (11)$$

для твердосплавного инструмента с TiAlN-покрытием

$$\theta = 416,5528 S_p^{-0,083} V^{0,338} A_0^{0,169}; \quad (12)$$

для твердосплавного инструмента с TiN/TiAlN-покрытием

$$\theta = 167,9887 S_p^{0,0432} V^{0,321} A_0^{0,1605}. \quad (13)$$

Из показателей S_p , V и A_0 разработанных уравнений (11)–(13) видно, что температура на поверхности раздела стружка–инструмент больше зависит от скорости резания, за которой следуют площадь поперечного сечения стружки и удельное давление резания. Тем не менее эти параметры можно рассматривать как более заметно влияющие на температуру резания для твердосплавного инструмента без покрытия, за которым следует твердосплавный инструмент с однослойным TiAlN-покрытием и твердосплавный инструмент с многослойным TiN/TiAlN-покрытием. Температура на поверхности раздела стружка–инструмент для твердосплавных инструментов без покрытия, инструментов с однослойным TiAlN-покрытием и инструментов

с многослойным TiN/TiAlN-покрытием при различных режимах резания рассчитывается с использованием формул (11)–(13) соответственно и показана в табл. 6.

Искусственная нейронная сеть

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это метод расчёта, который может моделировать отношения между входными и выходными параметрами. Существуют разные типы ИНС, однако наиболее часто используется многослойный персептрон (МП). Типичная архитектура МП, показанная на рис. 5, характеризуется тремя различными уровнями: входным слоем, скрытым слоем и выходным слоем, которые состоят из взаимосвязанной группы искусственных нейронов. Каждый нейрон в слое связан со всеми нейронами в соседних слоях. Количество нейронов, присутствующих во входном и выходном слое, равно количеству входных переменных и соответствующих выходных значений. Количество скрытых слоев и нейронов в этих слоях определяется пользователем.

Для более точного прогнозирования результатов важна тренировка или обучение разработанной сети. Процедура, используемая для выполнения процесса обучения, называется алгоритмом обучения, функция которого

заключается в упорядоченном изменении синоптических весов сети для достижения желаемого результата. Существуют различные алгоритмы обучения нейронной сети. Одним из наиболее предпочтительных алгоритмов обучения является алгоритм обратного распространения ошибки. Для типичного алгоритма ИНС пусть x_1, x_2, \dots, x_n будут входными данными, y_1, y_2, \dots, y_n – желаемым выходом и o_1, o_2, \dots, o_k – выходом, полученным из выходного слоя сети, когда x_1, x_2, \dots, x_n представлено на входном слое. На первом этапе инициализируются веса и пороги. Затем выходной сигнал каждого нейрона $f(wi)$ вычисляется из входных данных и инициализированных весов, что приводит к окончательному прогнозу выходных данных сети. Затем вычисляется ошибка на i -м выходном узле ($o_i - y_i$). Кроме того, веса между скрытым слоем и выходным слоем изменяются на основе ошибки в каждом выходном узле, и веса в предыдущих слоях модифицируются ошибками обратного распространения, вычисленными в узлах выходного слоя [20]. Этот процесс повторяется для набора входных и выходных обучающих данных. Обучение останавливается, когда выход нейронной сети достаточно близок к желаемому выходу для каждого набора.

Таблица 6

Table 6

Температура на границе раздела стружка–инструмент с различными моделями и инструментами
The chip-tool interface temperature with different models and tools

Эксп. № / Expt. no.	Инструмент без покрытия / Uncoated tool			Инструмент с TiAlN- покрытием / TiAlN coated tool			Инструмент с TiN/TiAlN- покрытием / TiN/TiAlN coated tool		
	CM	AP	ИНС	CM	AP	ИНС	CM	AP	ИНС
1	834	838	837	973	963	941	996	996	987
2	889	895	936	1021	1017	1027	1047	1049	1045
3	926	918	942	1054	1055	1041	1081	1082	1049
4	955	965	939	1085	1103	1099	1104	1114	1098
5	1019	1026	1037	1140	1137	1169	1161	1161	1172
6	1061	1061	1038	1176	1183	1217	1199	1203	1195
7	1056	1034	1078	1176	1182	1188	1191	1191	1195
8	1126	1114	1119	1235	1229	1210	1252	1245	1254
9	1173	1189	1178	1275	1288	1261	1293	1301	1275

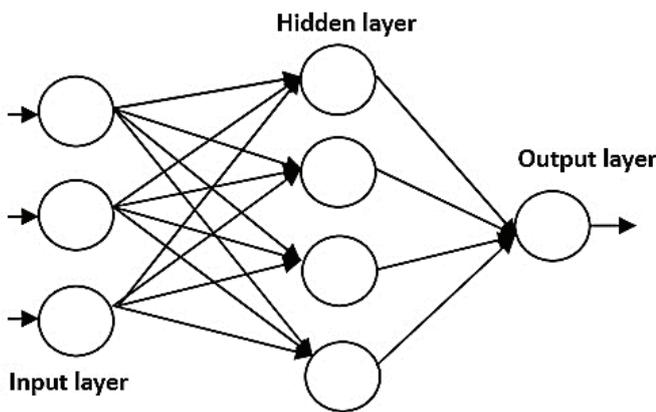


Рис. 5. Типичная архитектура ИНС

Fig. 5. Typical ANN architecture

Модель ИНС разработана для прогнозирования температуры на поверхности раздела стружка–инструмент с учетом входных параметров, таких как тип инструмента, скорость резания и подача, с использованием *MATLAB Toolbox*. Архитектура ИНС имеет три уровня: входной, выходной и скрытый, как показано на рис. 6. Входной слой имеет 3 нейрона, выходной слой – 1 нейрон, а скрытый слой – 8 нейронов. Нейронная сеть с прямой связью отображает набор данных числовых входов с набором числовых целей. Приложение *Neural Fitting* из *MATLAB Toolbox* поможет с выбором данных, а также с созданием и обучением сети, оценкой ее производительности с использованием среднеквадратичной ошибки и регрессионного анализа. В настоящем исследовании выбрана двухслойная сеть с прямой связью со скрытыми сигмовидными и линейными выходными нейронами, которые произвольно хорошо подходят для многомерных задач, при этом учитываются согласованные

данные и достаточное количество нейронов в ее скрытом слое. Сеть была обучена с помощью алгоритма обратного распространения ошибки *Левенберга–Марквардта* (*Levenberg–Marquardt*).

В нейронной сети для обучения и проверки тестовых данных используются три вида выборок. В настоящей работе около 70 % данных (экспериментальные результаты измерения температуры режущего инструмента) используется для обучения нейронной сети. Сеть настраивается по своей погрешности. Около 15 % данных используется для проверки результатов, предсказываемых обученной нейронной сетью. Эти наборы данных проверки применяют для измерения обобщения сети и для остановки обучения, когда обобщение перестает улучшаться, около 15 % данных используется для проверки результатов, предсказываемых нейронной сетью. Эти наборы данных не влияют на обучение и поэтому обеспечивают независимую оценку производительности сети во время и после обучения.

Следующим важным шагом является определение сетевой архитектуры, т. е. установка количества нейронов в скрытом слое подходящей сети. Нейроны в скрытом слое выбираются путем проверки точности сети. Количество нейронов на скрытом слое можно изменить, если сеть не работает должным образом после обучения. В настоящем исследовании нейронная сеть моделируется с учетом другого количества скрытых нейронов для получения большей точности предсказанных результатов: наибольшая точность предсказания (0,995) наблюдалась с 8 нейронами на скрытом слое. Кроме того, сеть должна быть обучена с использованием алгоритма *Левенберга–Марквардта*, байесовской регу-

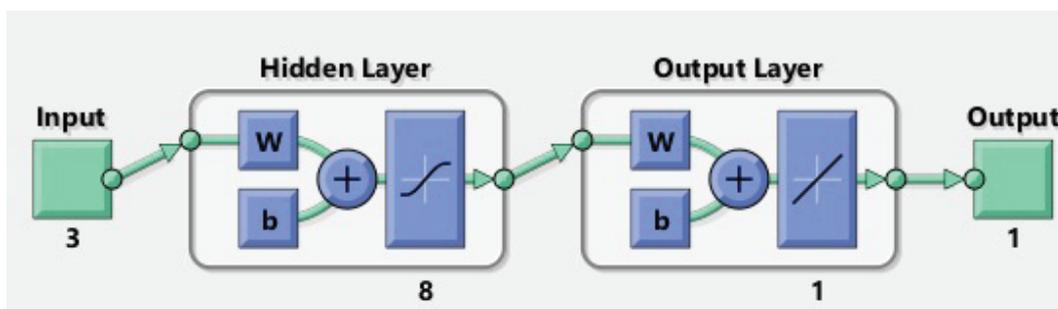


Рис. 6. Архитектура ИНС для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент

Fig. 6. ANN architecture to predict chip-tool interface temperature

ляризации или алгоритма масштабированного сопряженного градиента. Алгоритм байесовской регуляризации предпочтительнее для небольших и зашумленных наборов данных. Этот алгоритм дает хорошее обобщение, но требует больше времени. Алгоритм масштабированного сопряженного градиента требует меньше памяти и автоматически останавливается, когда обобщение перестает улучшаться. Однако исследователи в основном использовали алгоритм *Левенберга–Марквардта* для обучения нейронной сети. Этот алгоритм сравнительно быстрее других алгоритмов. Однако он требует больше памяти, и обучение автоматически останавливается, когда обобщение перестает улучшаться, на что указывает увеличение среднеквадратичной ошибки выборки проверки.

Эффективность обучения нейронной сети измеряется с помощью среднеквадратичной ошибки, которая представляет собой среднеквадратичную разницу между выходными данными и

целями. Более низкие значения лучше, и в настоящей работе лучшая эффективность проверки 417,9654 наблюдалась в периоде 7. Значения регрессии (R) измеряют корреляцию между выходными данными (прогнозируемыми значениями) и целевыми значениями (входными данными). Графики регрессии нейронной сети с коэффициентами регрессии, полученные при обучении модели, проверке, тестировании и для всего набора данных, показаны на рис. 7, а, б, в и г соответственно.

Значения коэффициентов регрессии, близкие к единице для обучения, проверки, тестирования и для всего набора данных, показывают, что разработанная модель нейронной сети может быть надежно использована для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки стали *SS304* для данной пары «инструмент–заготовка». Результаты, предсказанные нейронной сетью, показаны в табл. 6.

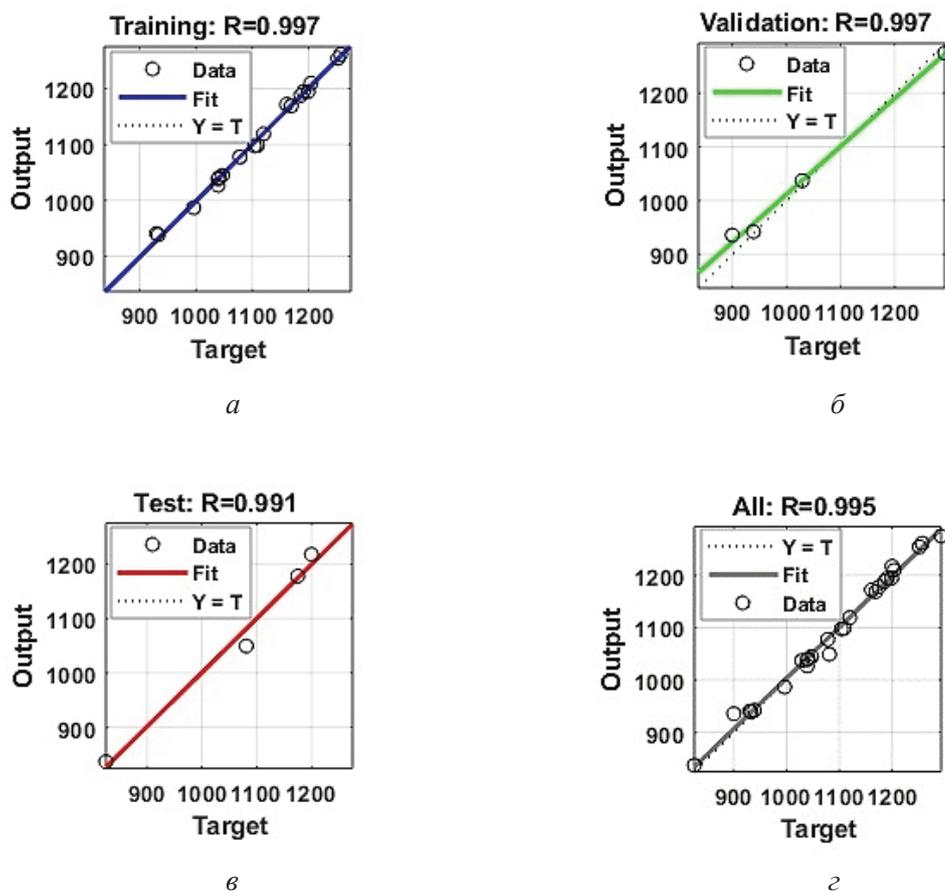


Рис. 7. Нейронная сеть:

а – обучение; б – проверка; в – тестирование; г – весь набор данных

Fig. 7. Neural network:

а – training; б – validation; в – test, г – all data set

Сравнительная оценка

В этом разделе представлена сравнительная оценка точности прогнозируемых результатов температуры на границе раздела стружка–инструмент со статистической моделью (СМ), подходом анализа размерностей (АР) и искусственной нейронной сетью (ИНС). Точность различных моделей оценивается путем получения процента ошибки между прогнозируемыми и экспериментальными значениями температуры на поверхности раздела стружка–инструмент при различных режимах резания. В табл. 6 представлены результаты, предсказанные разработанными моделями температуры на границе раздела стружка–инструмент для различных инструментов. Прогнозируемые результаты хорошо согласуются с экспериментальными (см. табл. 2) с абсолютной погрешностью менее 5 %. Однако результаты, предсказанные моделью ИНС, лучше согласуются с экспериментальными результатами по сравнению с моделями, основанными на статистическом и размерном анализе.

Было замечено, что на температуру на границе раздела стружка–инструмент сильнее влияет скорость резания, за которой следуют площадь поперечного сечения стружки и удельное давление резания. С увеличением скорости резания увеличивается потребность в энергии резания, что приводит к высокой температуре резания. Теплопроводность режущего инструмента также имеет большое влияние на температуру на границе раздела стружка–инструмент. При работе с инструментом без покрытия была зафиксирована самая низкая температура резания. Это может быть связано с его более высокой теплопроводностью и большой площадью износа инструмента во время обработки, что приводит к быстрому рассеиванию тепла на границе раздела в инструменте.

Более низкая температура резания, характерная в большей степени для инструмента с однослойным TiAlN-покрытием, чем для инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием, может быть объяснена его более высокой теплопроводностью, чем эквивалентная теплопроводность инструмента с TiN/TiAlN-покрытием. Более низкая теплопроводность инструмента с TiN/TiAlN-покрытием препятствует передаче

тепла, что приводит к повышению температуры на передней поверхности. Инструмент с таким покрытием также показал более высокую температуру резания, чем пластины с AlTiCrN- и AlTiN-покрытиями [21]. Однако более высокая температура резания многослойным инструментом помогает сделать обрабатываемый материал сравнительно мягким и, следовательно, может помочь в повышении производительности обработки. Меньшее усилие резания наблюдалось при использовании твердосплавного инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием. Это может быть связано с более низким коэффициентом трения, обеспечиваемым многослойной передней поверхностью инструмента для стекающей стружки, что находит подтверждение на задней поверхности стружки. Вместе с тем наибольшая сила резания наблюдалась у твердосплавных инструментов без покрытия. В настоящем исследовании делается вывод о том, что при точении сплава SS304 твердосплавными инструментами с однослойным TiAlN- и многослойным TiN/TiAlN-покрытиями требуется сравнительная оценка производительности обработки с точки зрения стойкости инструмента, механизмов износа инструмента, шероховатости поверхности и т. д.

Выводы

Эксперименты по токарной обработке аустенитной нержавеющей стали SS304 проводились с использованием твердосплавных инструментов без покрытия, а также с однослойным TiAlN и многослойным TiN/TiAlN PVD-покрытиями. Для измерения температуры резания использовался классический принцип инструментальной термопары. Температура на границе раздела стружка–инструмент была исследована с помощью статистического размерного анализа, а также модели искусственной нейронной сети. В результате можно сделать следующие выводы.

- Было замечено, что на температуру на границе раздела стружка–инструмент в большей степени влияет скорость резания, затем площадь поперечного сечения стружки и удельное давление резания. Инструмент без покрытия показал самую низкую температуру резания из-за его более высокой теплопроводности и большой площади износа инструмента во время обработки,

что привело к быстрому отведению тепла на границе раздела в инструмент.

- Для инструмента с однослойным TiAlN-покрытием наблюдалась более низкая температура резания, чем для инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием. Это можно объяснить его более высокой теплопроводностью. Однако при использовании твердосплавного инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием наблюдалось меньшее усилие резания, что можно связать с более низким коэффициентом трения, создаваемым передней поверхностью этого инструмента для стекающей стружки. С другой стороны, наибольшая сила резания наблюдалась у твердосплавных инструментов без покрытия.

- Результаты, предсказанные всеми разработанными моделями для температуры на границе раздела стружка–инструмент для различных инструментов, хорошо согласуются с экспериментальными результатами с абсолютной погрешностью менее 5 %. Тем не менее результаты, предсказанные моделью ИНС, лучше согласуются с экспериментальными результатами по сравнению с моделями, основанными на статистическом и размерном анализе, и, следовательно, разработанная модель ИНС может быть надежно использована для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки сплава SS304.

Список литературы

1. *Grzesik W.* Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – Vol. 39, iss. 3. – P. 355–369. – DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00044-3.

2. *Grzesik W.* The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – Vol. 79, iss. 1–3. – P. 133–143. – DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00491-3.

3. *Pal A., Choudhury S.K., Chinchanikar S.* Machinability assessment through experimental investigation during hard and soft turning of hardened steel // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 6. – P. 80–91. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.010.

4. *Abhang L.B., Hameedullah M.* Chip-tool interface temperature prediction model for turning process // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2, iss. 4. – P. 382–393.

5. *Alvelid B.* Cutting temperature thermo-electrical measurements // *Annals of CIRP*. – 1970. – Vol. 18. – P. 547–554.

6. *Chinchanikar S., Choudhury S.K.* Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 6. – P. 996–1005. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.170.

7. *Chinchanikar S., Choudhury S.K., Kulkarni A.P.* Investigation of chip-tool interface temperature during turning of hardened AISI 4340 alloy steel using multi-layer coated carbide inserts // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 701. – P. 354–358. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.701.354.

8. Effects of working parameters on performance characteristics of cutting tools processed through powder metallurgy under turning operation / T. Panneerselvam, T.K. Kandavel, S.A. Sreenivas, S. Karthik, M.M. Andru // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – Vol. 30, iss. 4. – P. 2890–2898. – DOI: 10.1007/s11665-021-05622-6.

9. A numerical model to obtain temperature distribution during hard turning of AISI 52100 steel / P.S. Bapat, P.D. Dhikale, S.M. Shinde, A.P. Kulkarni, S.S. Chinchanikar // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Vol. 2, iss. 4–5. – P. 907–914. – DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.150.

10. *Dhar N.R., Ahmed M.T., Islam S.* An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47, iss. 5. – P. 748–753. – DOI: 10.1016/j.ijmactools.2006.09.017.

11. *Anagonye A.U., Stephenson D.A.* Modeling cutting temperatures for turning inserts with various tool geometries and materials // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2002. – Vol. 124, iss. 3. – P. 544–552. – DOI: 10.1115/1.1461838.

12. Modern coatings in high performance cutting applications / W. Kalss, A. Reiter, V. Derflinger, C. Gey, J.L. Endrino // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2006. – Vol. 24, iss. 5. – P. 399–404. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.11.005.

13. *Grzesik W., Nieslony P.* Coupled thermo-mechanical FEM-based modelling of the tool-chip contact behaviour for coated cutting tools // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2012. – Vol. 11, iss. 1. – P. 20–35. – DOI: 10.1504/IJMMM.2012.044920.

14. *Jiang F., Yan L., Rong Y.* Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts – simulations and experiments // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 64. – P. 1555–1563. – DOI: 10.1007/s00170-012-4122-3.

15. *Grzesik W., Nieslony P.* Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface // *Wear*. – 2004. – Vol. 256, iss. 1–2. – P. 108–117. – DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00390-9.

16. *Knight W.A., Boothroyd G.* Fundamentals of metal machining and machine tools. – CRC Press, 2005. – 602 p. – ISBN 9781138502246.

17. *Whitney E.D.* Ceramic cutting tools: materials, development and performance. – William Andrew, 2012. – 381 p. – ISBN 9780815516316.

18. *Drucker D.C., Ekstein H.* A dimensional analysis of metal cutting // *Journal of Applied Physics*. – 1950. – Vol. 21, no. 2. – P. 104–107. – DOI: 10.1063/1.1699607.

19. *Sekulic S.* Investigation of tangential forces in metal cutting by dimensional analysis // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 1976. – Vol. 20, no. 2. – P. 55–64.

20. *Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G.* Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks // *Composite Structures*. – 2010. – Vol. 92, no. 12. – P. 2817–2829. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.04.008.

21. *Kulkarni A.P., Sargade V.G.* Characterization and performance of AlTiN, AlTiCrN, TiN/TiAlN PVD coated carbide tools while turning SS 304 // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30, no. 6. – P. 748–755. – DOI: 10.1080/10426914.2014.984217.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304

Atul Kulkarni^{1, a}, Satish Chinchani^{1, b, *}, Vikas Sargade^{2, c}

¹ Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Pune - 411048, Maharashtra, India

² Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Vidyavihar, Lonere, Dist. Raigad - 402103, Maharashtra, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>,  atul.kulkarni@viit.ac.in, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchani@viit.ac.in,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8855-112X>,  vgsargade@dbatu.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 July 2021

Revised: 19 August 2021

Accepted: 07 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Chip-tool interface temperature

Dimensional analysis

Artificial neural network

Coated tools

SS304

ABSTRACT

Introduction. During machining, the resulting temperature has a wider and more critical impact on machining performance. During machining, the power consumption is mainly converted into heat near the cutting edge of the tool. Almost all the work performed during plastic deformation turns into heat. Researchers have put a lot of effort into measuring the cutting temperature during machining, as it significantly affects tool life and overall machining performance. **The purpose of the work:** to investigate the temperature of the chip-tool interface, taking into account the influence of cutting parameters and the type of tool coating during SS304 turning. The chip-tool interface temperature is measured by changing the cutting speed and feed with a constant cutting depth for uncoated and PVD single-layer TiAlN and multi-layer TiN/TiAlN coated carbide tools. In addition, an attempt is made to develop a model for predicting the temperature of the chip-tool interface using dimensional analysis and ANN simulating to better understand the process. **The methods of investigation.** Experiments are carried out with varying the cutting speed (140-260 m/min), feed (0.08-0.2 mm/rev) and a constant cutting depth of 1 mm. The chip-tool interface temperature is measured using the tool-work thermocouple principle. The Calibration Setup is designed to establish the relationship between the produced electromotive force (EMF) and the cutting temperature during machining. Statistical dimensional analysis and artificial neural network models have been developed to predict the temperature of the chip-tool interface. Tangential cutting force and chip attributes such as chip width and thickness are also measured depending on the cutting conditions, which is a prerequisite for dimensional analysis simulation. **Results and Discussion.** A tool made of TiAlN carbide with PVD coating had a lower temperature at the chip-tool interface than a tool with TiN/TiAlN coating. It has been observed that the chip-tool interface temperature increases prominently with the cutting speed, followed by the chip cross-sectional area and the specific cutting pressure. However, a lower cutting force was observed when using a carbide tool with a multi-layer TiN/TiAlN coating, which can be attributed to a lower coefficient of friction created by the front surface of this tool for flowing chips. On the other hand, the greatest cutting force was observed in uncoated carbide tools. It was noticed that the developed models allow predicting the temperature of the chip-tool interface with an absolute error of 5%. However, the lowest average absolute error of 0.78% was observed with the ANN model and, therefore, can be reliably used to predict the chip-tool interface temperature during SS304 turning.

For citation: Kulkarni A.P., Chinchani S., Sargade V.G. Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 47–64. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64. (In Russian).

References

1. Grzesik W. Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39, iss. 3, pp. 355–369. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00044-3.
2. Grzesik W. The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 79, iss. 1–3, pp. 133–143. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00491-3.

* Corresponding author

Chinchani Satish, Ph.D. (Engineering), Professor
 Vishwakarma Institute of Information Technology,
 Pune, Maharashtra, India

Tel.: 91-2026950441, e-mail: satish.chinchani@viit.ac.in

3. Pal A., Choudhury S.K., Chinchani S. Machinability assessment through experimental investigation during hard and soft turning of hardened steel. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 80–91. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.010.
4. Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-tool interface temperature prediction model for turning process. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2, iss. 4, pp. 382–393.
5. Alvelid B. Cutting temperature thermo-electrical measurements. *Annals of CIRP*, 1970, vol. 18, pp. 547–554.
6. Chinchani S., Choudhury S.K. Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 996–1005. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.170.
7. Chinchani S., Choudhury S.K., Kulkarni A.P. Investigation of chip-tool interface temperature during turning of hardened AISI 4340 alloy steel using multi-layer coated carbide inserts. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 701, pp. 354–358. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.701.354.
8. Panneerselvam T., Kandavel T.K., Sreenivas S.A., Karthik S., Andru M.M. Effects of working parameters on performance characteristics of cutting tools processed through powder metallurgy under turning operation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, iss. 4, pp. 2890–2898. DOI: 10.1007/s11665-021-05622-6.
9. Bapat P.S., Dhikale P.D., Shinde S.M., Kulkarni A.P., Chinchani S.S. A numerical model to obtain temperature distribution during hard turning of AISI 52100 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 907–914. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.150.
10. Dhar N.R., Ahmed M.T., Islam S. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, iss. 5, pp. 748–753. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017.
11. Anagonye A.U., Stephenson D.A. Modeling cutting temperatures for turning inserts with various tool geometries and materials. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, iss. 3, pp. 544–552. DOI: 10.1115/1.1461838.
12. Kalss W., Reiter A., Derflinger V., Gey C., Endrino J.L. Modern coatings in high performance cutting applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2006, vol. 24, iss. 5, pp. 399–404. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.11.005.
13. Grzesik W., Nieslony P. Coupled thermo-mechanical FEM-based modelling of the tool-chip contact behaviour for coated cutting tools. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2012, vol. 11, iss. 1, pp. 20–35. DOI: 10.1504/IJMMM.2012.044920.
14. Jiang F., Yan L., Rong Y. Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts – simulations and experiments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 64, pp. 1555–1563. DOI: 10.1007/s00170-012-4122-3.
15. Grzesik W., Nieslony P. Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface. *Wear*, 2004, vol. 256, iss. 1–2, pp. 108–117. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00390-9.
16. Knight W.A., Boothroyd G. *Fundamentals of metal machining and machine tools*. CRC Press, 2005. 602 p. ISBN 9781138502246.
17. Whitney E.D. *Ceramic cutting tools: materials, development and performance*. William Andrew, 2012. 381 p. ISBN 9780815516316.
18. Drucker D.C., Ekstein H. A dimensional analysis of metal cutting. *Journal of Applied Physics*, 1950, vol. 21, no. 2, pp. 104–107. DOI: 10.1063/1.1699607.
19. Sekulic S. Investigation of tangential forces in metal cutting by dimensional analysis. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 1976, vol. 20, no. 2, pp. 55–64.
20. Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G. Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 2010, vol. 92, no. 12, pp. 2817–2829. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.04.008.
21. Kulkarni A.P., Sargade V.G. Characterization and performance of AlTiN, AlTiCrN, TiN/TiAlN PVD coated carbide tools while turning SS 304. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, no. 6, pp. 748–755. DOI: 10.1080/10426914.2014.984217.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств мехатронным профилографом

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

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

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

^c  <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>,  e_a_a@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.1.08

История статьи:

Поступила: 09 сентября 2021
 Рецензирование: 02 октября 2021
 Принята к печати: 16 октября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Мехатронный профилограф
 Сложные поверхности
 Обратное проектирование
 Винтовые движители
 Транспортные средства

Финансирование:

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

Благодарности:

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

Для цитирования: Исследование сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств мехатронным профилографом / С.А. Васильев, В.В. Алексеев, А.А. Федорова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 65–78. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-65-78.

Введение

В производственном процессе важным этапом является контроль качества изделий. В последнее время существенно повысились

качество выпускаемой продукции и производительность труда особенно изделий со сложными поверхностями, например, винтовых движителей транспортных средств. Проектирование таких сложных деталей и узлов проводится на этапе разработки модели в системе автоматизированного проектирования в виртуальной среде с целью обеспечения точности и технологичности изделия. Довольно сложно сразу найти и обеспечить весогеометрические характеристики

*Адрес для переписки

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

фасонных поверхностей изделий даже в системе автоматизированного проектирования. В то же время возникает вопрос о надежности и диагностике этих деталей и узлов в процессе эксплуатации, например, возможны поломки и отказы, связанные с нарушением геометрии винтов при контакте с инородными предметами в воздушной и водной среде.

Для исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств предлагается обратное проектирование с применением мехатронного профилографа [1]. Обратный инжиниринг позволяет представить в цифровом виде облако точек физической детали или узла машины. Как правило, облако точек представляет собой топологическую информацию о геометрии сложной поверхности изделия, которую можно использовать для создания его цифровой модели. Этот метод используется довольно часто при копировании деталей машин при условии отсутствия проектной документации или 3D-модели, при совершенствовании и модернизации узлов со сложными поверхностями, а также для создания непосредственно цифровых моделей изделий для виртуальных исследований в жидких средах расчетных программ.

Актуальность применения технологий обратного инжиниринга проявляется в различных отраслях народного хозяйства: машиностроении, сельском хозяйстве, медицине и других. Поэтому вопрос о создании Центра обратного инжиниринга в Фонде развития промышленности РФ был поднят на заседании Правительственной комиссии по импортозамещению министром промышленности торговли РФ Д.В. Мантуровым.

Поверхность сложной детали не всегда является идеально ровной, гладкой и геометрически правильной, на ней можно выделить определенные микро- и макрогеометрические отклонения. К макрогеометрическим отклонениям относят волнистость и отклонения формы поверхности сложной детали. Для этого используют соотношение отклонения шага к значению отклонения от номинального контура. Например, отклонением от формы считается отношение шага к значению отклонения больше 1000.

Для определения этих параметров в металлообработке используют профилографы (от профиль и ...граф), позволяющие измерить неровности поверхности и представить результаты в

виде профилограммы, характеризующей волнистость, шероховатость и форму поверхности.

ГОСТ Р ИСО 4287–2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности» нормирует не только показатели шероховатости, но и волнистости, а также показатели первичного профиля. Поэтому уже сегодня переход машиностроительных предприятий на ГОСТ Р ИСО 4287–2014 несет в себе ряд сложностей, в том числе понадобится новое и современное измерительное оборудование, обеспечивающее построение профилограмм для реализации профильного метода.

Сегодня известны различные методы получения информации о физическом объекте с применением разных устройств для сбора данных. Условно их можно разделить на две группы: контактные способы – атомно-силовая микроскопия, стилусная профилометрия и прочее [2, 3] и бесконтактные способы – методы, реализуемые с помощью лазерных приборов, обработкой изображений и другие [4–8]. Например, определение морфологических параметров и форм сложных поверхностей проводилось бесконтактным методом в работах [9–11] по машиностроению, в трудах [12–15] для сельского хозяйства. Васильевым С.А. разработан профилограф, сканирующий поверхность цилиндрическим методом [16–17]. К числу основных преимуществ этой группы способов можно отнести время получения информации, ее точность, удобство и простоту применения приборов. Есть и недостатки, которые проявляются при исследовании поверхностей, связанные с явлением дифракции лучей лазера на гладких участках, но эти ошибки можно программно устранить в процессе обработки информации [18].

С учетом вышесказанного сформулируем цель исследований – разработка новой технологии исследования сложных поверхностей винтовых движителей, к которым относят гребневые и воздушные винты транспортных средств, мехатронным профилографом для реализации обратного инжиниринга.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– на основе обзора методов обратного проектирования и измерительных приборов пред-

ложить технологию исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств и конструкцию мехатронного профилографа;

– разработать мехатронный профилограф, с помощью его применения провести теоретические и экспериментальные исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств, получить и обработать информацию об их профиле;

– провести экспресс-анализ сложных поверхностей изделий, имеющих поворотную симметрию, и установить различия форм поверхностей лопастей по величинам отклонений в продольном и поперечном направлении.

Методика исследований

В качестве устройства для исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств предлагается разработанный мехатронный профилограф (рис. 1). Про-

филограф предназначен для измерения профиля и исследования формы сложных поверхностей различных изделий, а также определения геометрических и морфологических параметров этих поверхностей. Устройство позволяет получить профилограмму, характеризующую волнистость, шероховатость и форму поверхности по круговой траектории. Он может использоваться в машиностроении, в том числе для обратного инжиниринга.

Мехатронный профилограф содержит: основание; стойку, на которой установлены угловой датчик и с помощью подшипников качения корпус с размещенными в нем блоком питания и блоком управления; неподвижное опорное колесо и взаимодействующий с ним сателлит; ноутбук, оснащенный информационной системой измерения и компьютерным управлением для согласованной работы электродвигателей в процессе измерения, а также программой приема и обработки; показателей датчиков и приборов; направляющую; каретку; лазерный датчик

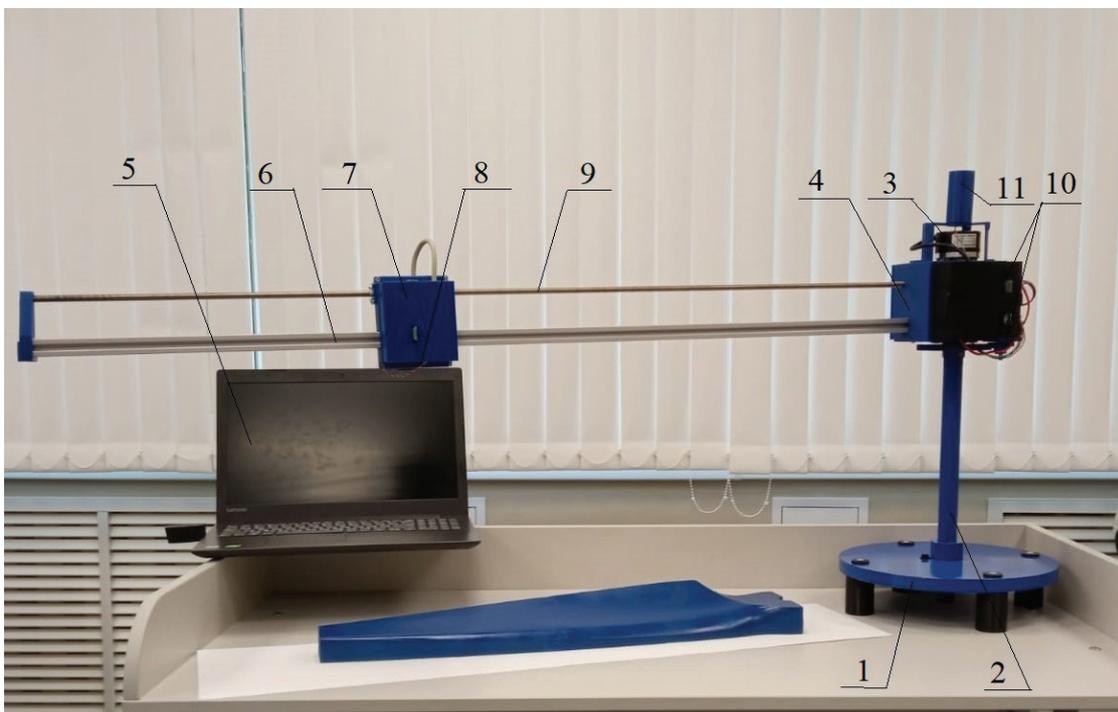


Рис. 1. Общий вид мехатронного профилографа:

1 – основание; 2 – стойка; 3 – угловой датчик; 4 – корпус; 5 – ноутбук; 6 – направляющая; 7 – каретка; 8 – лазерный датчик положения; 9 – винт; 10 – электродвигатели; 11 – акселерометр и гироскоп

Fig. 1. General view of the profiler:

1 – base; 2 – rack; 3 – angle sensor; 4 – housing; 5 – laptop; 6 – guide; 7 – carriage; 8 – laser position sensor; 9 – screw; 10 – electric motors; 11 – accelerometer and gyroscope

положения; винт; электродвигатели [использовался щеточный двигатель TETRIX® MAX TorqueNADO® Motor W44260 (12 В постоянного тока с частотой вращения 100 об/мин и крутящим моментом 4,9 Н · м) и шаговый двигатель NEMA 17 42HS48-1684-08AF (номинальный ток: 1,68 А, крутящий момент: 5,0 кг/см, номинальное напряжение: 2,8 В, угол поворота/шаг: 1,8°)]; акселерометр и гироскоп. Для перемещения каретки выбран шаговый двигатель, так как не требуется высокий крутящий момент, а для вращения консоли он необходим.

Корпус установлен на стойке с помощью подшипников качения, для привода вращения которого используется неподвижное опорное колесо, сателлит и электродвигатель, расположенный на подвижном корпусе. Связь ноутбука с блоком управления, датчиками, электродвигателями и измерительными приборами обеспечивается через Bluetooth-соединение при помощи Bluetooth-радиомодулей, встроенных в лазерный датчик, блок управления и ноутбук.

Для создания конструкции, состоящей из каретки с лазерным датчиком положения, направляющей и винта, использовалась безлюфтовая бронзовая гайка с точностью изготовления Н7 и трапецеидальный винт диаметром 8 мм. Причем гайка состоит из двух частей, между которыми устанавливается пружина. Сила упругости пружины отталкивает части гайки друг от друга, что позволяет уменьшить люфт и снизить погрешность вращательно-поступательного движения. Направляющая, изготовленная из Т-образных пазов в алюминиевом профиле, позволяет легко фиксировать подвижную каретку при поступательном перемещении. Предварительные расчеты на прочность конструкции показали, что на расстоянии одного метра при консольном расположении направляющей величина деформации от собственного веса составляет 1,12 мм, а при воздействии каретки с датчиком весом 0,15 кг в целом вызывает линейную деформацию 1,79 мм.

При проверке мехатронного профилографа учтены эти погрешности, причем проведен внешний осмотр, опробование, подтверждение программного обеспечения, определение метрологических характеристик. Опробование мехатронного профилографа проводили при помощи поверочной плиты.

В лазерном датчике за основу взят принцип оптической триангуляции (максимальная частота обновления данных составляет 2 кГц, разрешение – 0,01 % от диапазона), а в угловом энкодере фиксируется цикл прохождения магнитного полюса вращающегося магнита, расположенного поблизости от чувствительного элемента. Установлены метрологические характеристики информационно-измерительной системы: диапазон измерения расстояния от датчика до поверхности от 100 до 500 мм, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений $\pm 0,05$ % от диапазона, диапазон измерения по окружности от 0 до 360°, пределы допускаемой погрешности углового энкодера $\pm 30''$. При проверке мехатронного профилографа проведен внешний осмотр, опробование, подтверждение программного обеспечения, определение метрологических характеристик.

Техническая характеристика мехатронного профилографа: габаритные размеры – 1450×25×550 мм, диапазон изменения угловой скорости перемещения датчика – 0,1...2,5 рад/с, диапазон изменения радиальной скорости перемещения датчика – 0,0001...0,01 м/с, напряжение сети углового энкодера серии E60H – 5 В DC, потребляемый ток – ≤ 80 мА; количество импульсов на один оборот – от 1024 до 8192, диапазон рабочих температур – от –10 до +70 °С, частота ответа – до 300 кГц.

Для реализации профилирования сложной поверхности используют мехатронную систему измерения в виде мехатронного профилографа, оснащенного информационной системой измерения.

При профилировании сложной поверхности деталей вначале размещают мехатронный профилограф на исследуемую поверхность или около нее на горизонтально расположенном столе, если деталь имеет небольшие размеры. Для точного определения горизонтальной поверхности, в которой перемещается лазерный датчик в процессе исследования, используют акселерометр и гироскоп. Акселерометр и гироскоп – устройства, которые частично дублируют себя, дополняя друг друга, повышают точность получаемых данных. Гироскоп служит для отслеживания положения лазерного датчика в пространстве путем определения собственного угла наклона относительно земной поверхности. Акселерометр

в состоянии покоя позволяет вычислить угол наклона относительно вектора силы тяготения земли. На экране монитора отображается отклонение поверхности вращения лазерного датчика от уровня в цифровом виде в двух перпендикулярных направлениях. Для корректировки горизонтального положения отклоняют стойку, добиваясь нулевых отклонений от горизонтали в продольном и поперечном направлении. Для этого используют, например MPU6050, который представляет собой трехосевой гироскоп, а также трехосевой акселерометр в одном корпусе.

Вначале определяют профиль сложной поверхности детали по окружности, ограничивающей измеряемую площадку, профилографом, оснащенным информационной системой. Для этого запускают программу на ноутбуке и включают профилограф. Через блок управления верхний двигатель перемещает с помощью винта на периферию измеряемой площадки лазерный датчик положения по направляющей, а нижний двигатель через блок управления поворачивает на необходимый угол направляющую в нулевое положение, перекачивая сателлит по неподвижному опорному колесу. Далее программа с ноутбука запускает только нижний двигатель, сканируется поверхность по периферии площадки. С помощью Bluetooth-соединения информация с датчика с радиомодулем Bluetooth передается на радиомодуль Bluetooth блока управления и далее в ноутбук, где также имеется встроенный модуль Bluetooth. Компьютерная программа по полученной информации изображает построение профиля по окружности в полярных координатах по двум параметрам: расстояние между датчиком положения и сложной поверхностью детали, а также соответствующий этому положению угол поворота от нулевой отметки по угловому датчику. Информационная система измерения мехатронного профилографа – это совокупность функционально - объединенных измерительных (датчики), контрольных (контроль и сравнение с моделями различных профилей), диагностических (акселерометр, гироскоп), вычислительных (ноутбук), управляющих (ноутбук, электродвигатели), регистрирующих (ноутбук), отображающих (ноутбук), телекоммуникационных (ноутбук) и других вспомогательных технических средств, сформированная для получения измерительной информации, ее преобразования и об-

работки, передачи измерительной информации по назначению. Она формирует по признакам, характеризующим свойства профилей сложных поверхностей (наклон, кривизну, волнистость, шероховатость), решение о принадлежности распознаваемого профиля к той или иной модели (гладкая, шероховатая, волнистая, фасонная поверхность). Причем для каждой модели применяется соответствующая траектория перемещения датчика, например спираль Архимеда с заданным шагом.

Рассмотрим траекторию движения лазерного датчика, которая представляет собой кривую в виде спирали Архимеда (рис. 2), координаты которой определяются в полярных координатах точкой лазерного датчика $M(r_i, \varphi_i, z_i)$:

$$\begin{cases} r_i = k\varphi_i, \\ z_i = H_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где r_i – смещение т. M на угле φ_i от центра вращения, м; φ_i – угол поворота т. M в i -м положении, рад; z_i – значение аппликаты т. M в i -м положении, м; H_i – значение расстояния до поверхности, м; k – смещение т. M на угле, равном одному рад, определяемое по формуле

$$k = \frac{S_{\text{рад}}}{2\pi}, \quad (2)$$

где $S_{\text{рад}}$ – радиальный шаг спирали.

Радиальный шаг спирали $S_{\text{рад}}$ вычисляется по формуле

$$S_{\text{рад}} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_5}{Z_4} S_{\text{винт}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{винт}}$ – шаг ходового винта; Z_1 – количество зубьев сателлита 1; Z_2 – количество зубьев опорного колеса 2; Z_4 – количество зубьев опорного колеса 4; Z_5 – количество зубьев сателлита 5.

Окончательно уравнение спирали Архимеда (1) с учетом уравнений (2) и (3) примет вид

$$\begin{cases} r_i = \frac{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_5}{Z_4} S_{\text{винт}}}{2\pi} \varphi_i, \\ z_i = H_i = 0. \end{cases} \quad (4)$$

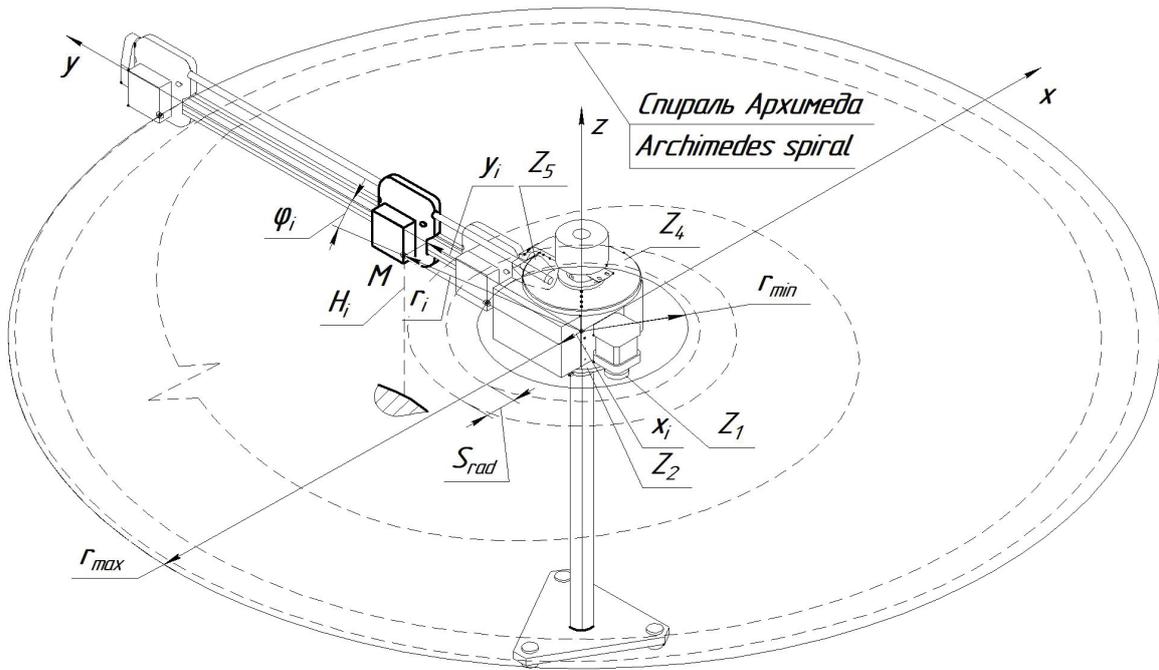


Рис. 2. Траектория движения т. М лазерного датчика

Fig. 2. The trajectory of the M point of the laser sensor

Координаты x_i, y_i связаны с углом φ_i в полярных координатах формулами

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \varphi_i, \\ y_i = r_i \sin \varphi_i. \end{cases} \quad (5)$$

При небольших значениях радиального шага $S_{\text{рад}}$ и больших значениях радиусов сканирования r_i можно условно представить спираль Архимеда совокупностью окружностей с шагом $S_{\text{рад}}$. Тогда радиус i -й окружности r_i можно определить по формуле

$$r_i = r_{i-1} + S_{\text{рад}}, \quad (6)$$

где r_i – радиус i -й окружности на i -м обороте, равный максимальному значению r_i ; r_{i-1} – радиус $(i - 1)$ окружности на $(i - 1)$ -м обороте, равный максимальному значению r_{i-1} .

В то же время длина окружности будет меняться:

$$L_{\text{окр } i} = 2\pi r_i = 2\pi(r_{i-1} + S_{\text{рад}}). \quad (7)$$

Лазерный датчик имеет фиксированную частоту измерения, поэтому окружной шаг $S_{\text{окр } i}$

i -й окружности на i -м обороте при постоянной частоте вращения двигателя можно определить по формуле

$$S_{\text{окр } i} = \frac{L_{\text{окр } i} \omega}{2\pi \nu} = \frac{2\pi r_i \omega}{2\pi \nu} = \frac{r_i \omega}{\nu} = \frac{r_i \pi i}{30 \nu} i_{13}^2, \quad (8)$$

где ν – частота обновления данных лазерного датчика, Гц; ω – постоянная угловая скорость водила δ , рад/с; i_{13}^2 – передаточное отношение цилиндрической передачи от сателлита 1 к водилу 3 при опорном колесе 2; $L_{\text{окр } i}$ – длина i -й окружности, мм.

Из формулы (8) видно, что при равномерном вращении двигателя с удалением лазерного датчика от центра профилографа окружной шаг $S_{\text{окр } i}$ будет увеличиваться.

Следовательно, для сохранения постоянства окружного шага на любой окружности движение должно быть замедленным при вращении с удалением лазерного датчика от центра. Тогда формулу (8) можно переписать в следующем виде:

$$S_{\text{окр } i} = \frac{r_i \omega_{\text{ср } i}}{\nu}, \quad (9)$$

где $\omega_{\text{ср } i}$ – средняя угловая скорость водила δ на i -м обороте, рад/с.

Для определения угловой скорости приравняем окружные шаги на разных оборотах:

$$S_{\text{окр } i} = S_{\text{окр } (i-1)}. \quad (10)$$

С учетом уравнения (8) уравнение (10) примет вид

$$\frac{r_i \omega_i}{v} = \frac{r_{i-1} \omega_{i-1}}{v} = \text{const}, \quad (11)$$

$$\omega_i = \frac{S_{\text{окр}} v}{r_i}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видим, что в числителе величина постоянная, которая зависит от выбранных параметров: частоты обновления данных лазерного датчика, задаваемой при программировании, а также от выбранного окружного шага, задаваемого пользователем и зависящим от различных измеряемых параметров поверхности. В знаменателе – величина переменная, находящаяся в диапазоне

$$r_i \in (r_{\text{min}}, r_{\text{max}}), \quad (13)$$

где r_{min} – минимальный радиус сканирования, равный наружному радиусу основания профилографа, м; r_{max} – максимальный радиус сканирования, равный максимальному радиусу плеча профилографа, м.

График зависимости угловой скорости ω_i от радиуса сканирования r_i представляет собой гиперболу (рис. 3, а).

Формула (12) для определения угловой скорости ω_i в зависимости от радиуса сканирования r_i при выбранном окружном шаге $S_{\text{окр}}$, например равном 2 мм, и заданной частоте обновления данных лазерного датчика $v = 100$ Гц примет вид

$$\omega_i = \frac{S_{\text{окр}} v}{r_i} = \frac{0,002 \cdot 100}{r_i} = \frac{0,2}{r_i}. \quad (14)$$

После обработки полученных данных в Excel был получен график зависимости угловой скорости ω_i от радиуса сканирования r_i или от количества оборотов N для экспериментальной установки профилографа (рис. 3, б).

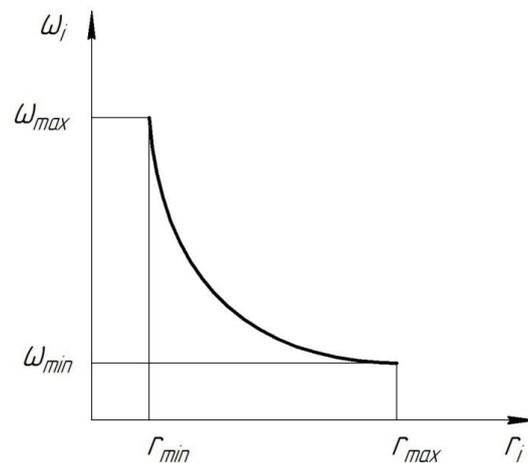
Судя по графику, полученному при заданных технологических параметрах мехатронного профилографа (рис. 3, б), можно сделать вывод, что для постоянного шага спирали величиной 2 мм значение угловой скорости должно плавно уменьшаться от максимального значения 2 рад/с до минимального значения 0,574 рад/с. Таким образом, технологическая скорость выполнения операции замера уменьшилась в 3,484 раза.

Выбор электродвигателей не зависел от графика угловой скорости, а сделан по крутящему моменту. Полученная зависимость угловой скорости от радиуса сканирования позволила установить, как эффективнее управлять двигателем в составе привода при сканировании поверхности по спирали Архимеда.

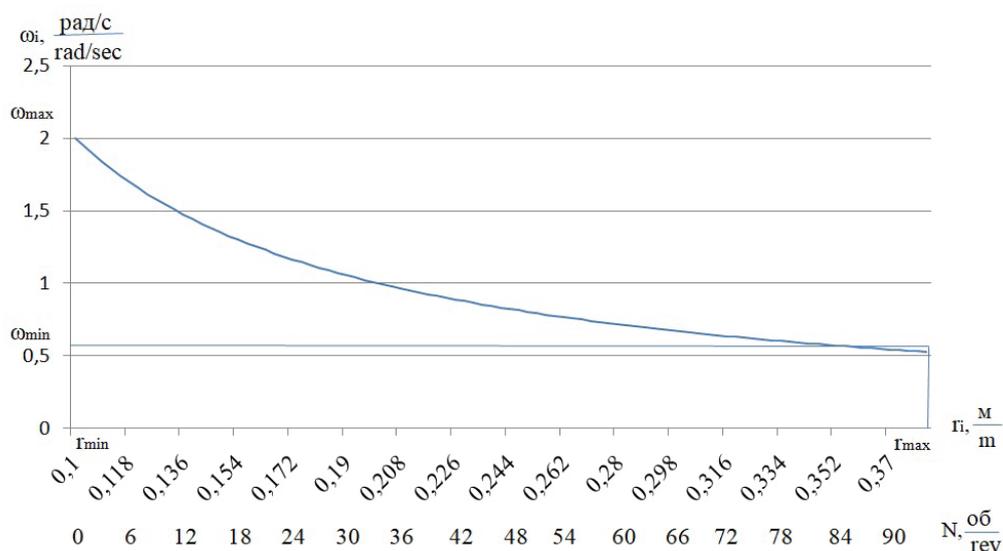
При сканировании по спирали Ферма сначала первый шаг выполняется по окружности, а второй шаг – по спирали, которая представляет собой плоскую кривую – траекторию точки, равномерно движущейся вдоль радиуса-вектора с началом в точке O (рис. 4). Траектория движения датчика по параболической спирали Ферма обеспечивает оптимальный охват площади участков заданным количеством точек замера, которые равномерно распределяются по всей исследуемой площади. Например, площадь участка между первым и вторым витком будет равна площади участка между вторым и третьим витком, равна площади участка между третьим и четвертым витком и т. д.

Затем определяют профиль сложной поверхности детали (в нашем случае модель лопасти винтового движителя транспортного средства) по этой спирали или по кривой путем перемещения лазерного датчика положения от нулевой отметки и далее по заданной траектории. На рис. 1 представлен один из этапов обратного инжиниринга, получение и проверка 3D-модели винта из дюралюминия.

Контролируемый винт располагается так, чтобы он находился в зоне рабочего диапазона датчика. Кроме того, в области прохождения падающего на винт и отраженного от него излучения не должно находиться посторонних предметов. При контроле винтов сложной формы и текстуры должно быть минимизировано попадание зеркальной составляющей отраженного излучения во входное окно датчика.



а



б

Рис. 3. График зависимости угловой скорости ω_i от радиуса сканирования r_i :
 а – теоретический; б – экспериментальный

Fig. 3. Graph of the dependence of the angular velocity ω_i on the scanning radius r_i :
 а – theoretical; б – experimental

Винт укладывают на плоскую поверхность длиной не менее длины самого объекта, предназначенного для проведения измерений, например поворачивную плиту или стеллаж. Винт на плоской поверхности должен лежать свободно без воздействия каких-либо внешних сил, например нажима, натяжения, кручения.

При подаче сигнала от ноутбука через блок управления начинают работать два двигателя, которые с помощью приводов перемещают датчик положения по направляющей, которая, в свою очередь, вместе с корпусом поворачивается по опорному колесу. Информационная система измерения позволяет представить информацию

в полярных координатах по двум параметрам для заданной спирали: расстояние между датчиком положения и поверхностью почвы, а также соответствующий этому положению угол поворота от нулевой отметки по угловому датчику. Рассматриваем двумерную систему координат как систему, в которой каждая точка на плоскости определяется двумя числами – полярным углом (угол поворота по угловому датчику) и полярным радиусом (расстояние от датчика положения до поверхности детали). Эта система координат в нашем случае удобна, так как отношения между точками проще изобразить в виде радиусов и углов.

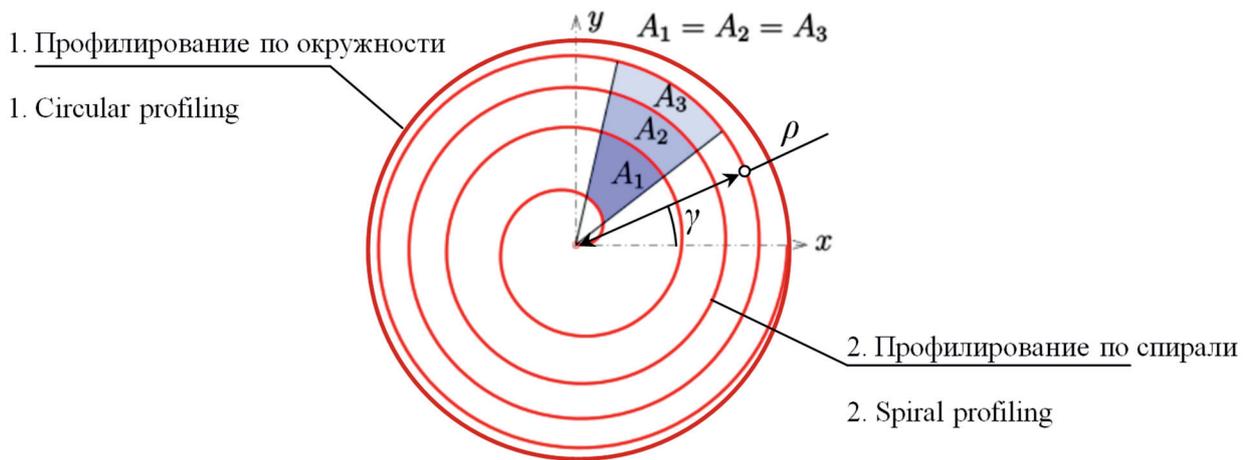


Рис. 4. Траектория движения датчика по окружности и спирали

Fig. 4. Trajectory of the sensor movement in a circle and a spiral

Вследствие того что информация с датчика передается с каждого витка спирали, может происходить наложение кривых в полярных координатах.

Полученную информацию представляют при известном полярном уравнении спирали, заложенном в информационную систему измерения, например, для спирали Ферма:

$$r = \sqrt{a^2 \varphi}, \quad (15)$$

где r – радиус-вектор, м; a – коэффициент спирали; φ – угол положения радиуса-вектора от нулевой отметки в градусах.

Для перевода в декартову систему координат используют уравнения

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi, \\ y = r \sin \varphi, \\ z = z, \end{cases} \quad (16)$$

где x – продольная координата, м; y – поперечная координата, м; z – вертикальная координата поверхности детали на заданной точке, м.

Результаты и их обсуждение

Предлагаемый подход значительно упрощает исследования даже в случае сложной формы поверхности, описание которой предполагает использование специальных функций (например, Риккати, Бесселя или Якоби), а также их комбинаций. Сканирование позволяет получить

большой массив достаточно точных цифровых данных. Это делает возможным составление, анализ и выбор наиболее адекватных цифровых моделей поверхности [19–21].

В случае сканирования объектов, когда датчик движется над исследуемой поверхностью по спирали Архимеда $r = \alpha \varphi$ (или Ферма $r^2 = \alpha^2 \varphi$), имеется относительно высокая скорость обработки площади поверхности, поскольку процесс непрерывный и нет необходимости в снижении скорости из-за остановок, сопутствующих челночному сканированию. Шаг спирали выбирается из каждого конкретного условия задачи и в разработанном устройстве может быть достаточно малым. Поэтому для соседних точек изучаемой поверхности даже линейная модель позволяет добиться высокой точности описания, не говоря уже о нелинейных вариантах. Практика показывает, что относительно быстро и нетрудоемко подбираются модели с $R^2 > 0,99$, т. е. менее 1 % статистических данных не описывается подобранными формулами. Приведенные цифры необходимо рассматривать на фоне того, что дефекты самих объектов, такие как различного рода сколы, изгибы и прочее приводят как минимум к 5...10 %-м расхождениям в данных. Обозначенный факт дает возможность с помощью экстраполяции данных получать функции, описывающие поверхность исходя из интересующих условий. Это могут быть данные как в декартовой системе координат, так и данные с постоянным полярным углом, постоянным радиусом или какими-либо другими условиями.

В случае необходимости внесения корректив значения, получаемые из функций расчетным образом, можно сравнивать с непосредственно отсканированными, поскольку разработанное устройство может осуществлять сканирование по любой заданной траектории.

Одним из вариантов практического использования может выступать экспресс-анализ состояния поверхности объектов, имеющих поворотную симметрию. Использование цилиндрических координат в данном случае логично и имеет следующие преимущества:

- отслеживание динамики изменения расстояния H вдоль полярного радиуса r при неизменном полярном угле φ в виде функций $\zeta_\varphi(r)$. Их получают выделением из массива данных значений, соответствующих определенным полярным углам. Шаг $\Delta\varphi$ между полярными углами выбирается исходя из конкретных целей исследования;

- отслеживание динамики изменения формы расстояния H вдоль полярного угла φ при неизменном полярном радиусе r в виде функций $\xi_r(\varphi)$. Их получают выделением из массива данных значений, соответствующих определенным значениям радиуса, с интересующим шагом Δr .

Одновременное использование $\zeta_\varphi(r)$ и $\xi_r(\varphi)$ для анализа поверхности дает возможность изучить «эволюцию» формы поверхности при радиальном или угловом смещении вдоль каждой лопасти винта. Таким образом, достаточно быстро и нетрудоемко могут быть оценены дефекты нагнетающей и засасывающей поверхностей каждой лопасти, входящей и выходящей кромок: количество сколов, их площадь, максимальная глубина, средний объем. Далее производится как оценка дефектов формы лопастей, так и сравнение форм различных лопастей между собой, при которой исследуются: отклонения, изгибы или деформации в радиальном и перпендикулярном ему направлении, различия в площадях лопастей.

Как уже было указано, высокие значения коэффициентов детерминации моделей, описывающих поверхность, позволяют эффективно экстраполировать данные и переходить из одной системы координат (r_i, φ_i, H_i) в другую (x_k, y_k, z_k) .

Кроме формулы (16), при пересчетах площадей и объемов следует помнить, что Якобиан перехода

$$J(r, \varphi, H) = \begin{vmatrix} x'_r & x'_\varphi & x'_H \\ y'_r & y'_\varphi & y'_H \\ z'_r & z'_\varphi & z'_H \end{vmatrix} = r, \quad (17)$$

т. е. $dS_{xyz} = r dS_{r\varphi H}$, а $dV_{xyz} = r dV_{r\varphi H}$

После того как получены экспериментальные данные, они разделяются на массивы. Для каждой лопасти производится оценка формы поверхности путем анализа ΔH_i – отклонений экспериментальных значений от значений, рассчитанных по регрессионным зависимостям. По значениям, статистически значимо превышающим среднее отклонение на поверхности, определяются границы сколов и прочих дефектов, а затем рассчитываются их параметры: площадь, максимальная глубина, средний объем исходя из приближения.

Следующий этап – изучение различия форм поверхностей лопастей. Для его реализации сравниваются данные, соответствующие одним и тем же значениям радиуса r при изменении угла φ вдоль каждой лопасти и, наоборот, сравниваются данные, соответствующие одним и тем же значениям угла φ при изменении полярного радиуса r вдоль каждой лопасти, т. е. используются функции $\zeta_\varphi(r)$ и $\xi_r(\varphi)$. Обозначив через Δz_{jk} отклонения в значениях между j - и k -лопастями, получим возможность определить как величину отклонения вдоль радиуса γ , так и δ – угла отклонения в перпендикулярном радиусу направлении.

Для винтовых движителей с осерадиально-переменным шагом (шаг винтовых линий изменяется как вдоль оси, так и по радиусу) угол между кривыми поверхностями соседних лопастей, соответствующими одним и тем же значениям радиусов, меняется, причем расстояния между кривыми также возрастают.

По результатам экспериментальных исследований после рассмотрения массива величин отклонений ΔH_i для соответствующих точек разных лопастей винта была получена зависимость нарастания отклонений от полярных радиуса и угла (рис. 5).

Двухфакторная степенная модель, описывающая отклонения формы лопасти с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,967$, имеет вид $H = 1,071 \cdot 10^{-4} r^{5,487} \varphi^{9,017}$, т. е. в среднем угол отклонения в перпендикулярном радиусу направ-

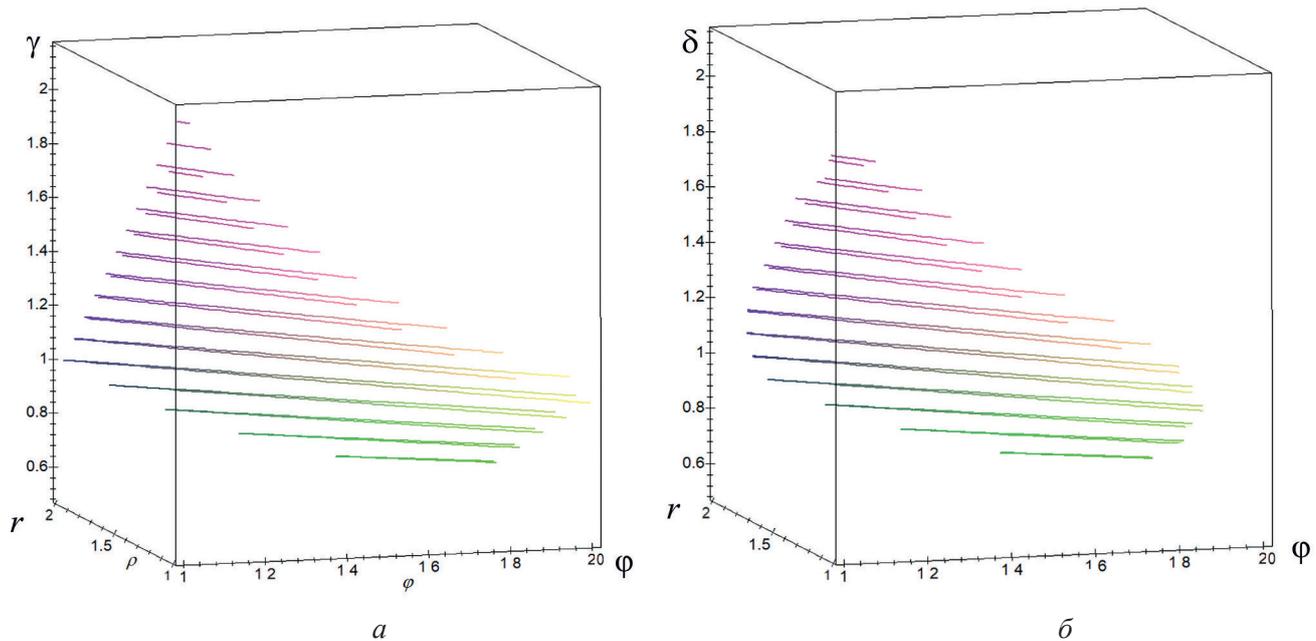


Рис. 5. Определение величин отклонений:

$$a - \gamma; \bar{b} - \delta$$

Fig. 5. Determination of deviation values:

$$a - \gamma; \bar{b} - \delta$$

лении δ возрастает от 0 до $0,3^\circ$, а угол отклонения вдоль радиуса γ возрастает от 0 до $5,4^\circ$.

Таким образом, в процессе исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств путем обратного инжиниринга с применением разработанного мехатронного профилографа установлены его конструктивно-технологические параметры, проведен экспресс-анализ поверхностей винтов, имеющих поворотную симметрию и установлены различия форм поверхностей лопастей винта по величинам отклонений в продольном и поперечном направлении для разных радиусов.

Выводы

1. Предложены новый метод исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств и конструкция мехатронного профилографа на основе обзора методов обратного проектирования.

2. Для разработанного мехатронного профилографа на основании теоретических и экспериментальных исследований выявлены основные конструктивно-технологические параметры и установлена гиперболическая зависимость угловой скорости перемещения лазерного датчика

от радиуса сканирования. Например, для постоянного шага траектории по спирали Архимеда величиной 2 мм значение угловой скорости датчика должно плавно уменьшаться от максимального значения в 2 рад/с до минимального значения 0,574 рад/с, т.е. в 3,484 раза.

3. Проведен экспресс-анализ поверхностей винтовых движителей транспортных средств, имеющих поворотную симметрию и установлены различия форм поверхностей лопастей винта по величинам отклонений в продольном и поперечном направлении для разных радиусов. На основании экспериментальных данных получена двухфакторная степенная модель, описывающая отклонения с коэффициентом детерминации 0,967, по анализу которой видно, что в среднем угол отклонения в перпендикулярном радиусу направлении δ возрастает от 0 до $0,3^\circ$, а угол отклонения вдоль радиуса γ возрастает от 0 до $5,4^\circ$.

Список литературы

1. Feature-based reverse modeling strategies / Y. Ke, S. Fan, W. Zhu, A. Li, F. Liu, X. Shi // Computer-Aided Design. – 2006. – Vol. 38, iss. 5. – P. 485–506. – DOI: 10.1016/j.cad.2005.12.002.
2. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing // Measurement. – 2013. – Vol. 46 (7). – P. 2065–2072. – DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.

3. *Lushnikov N., Lushnikov P.* Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Vol. 20. – P. 425–429. – DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.
4. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser / V.V. Alexander, H. Deng, M.N. Islam, F.L. Terry // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*. – San Jose, CA, 2010. – P. AFA3. – DOI: 10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3.
5. *Rao C.B., Raj B.* Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques // *Sadhana*. – 2003. – Vol. 28, pt. 3–4. – P. 739–761. – DOI: 10.1007/BF02706457.
6. *Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N.* Portable non-contact surface roughness measuring device // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 469. – P. 012074. – DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
7. *Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S.* Vision system in quality control automation // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 144. – P. 03008. – DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
8. *Shih F.Y.* Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. – Piscataway, NJ: IEEE Press; Hoboken, NJ: Wiley, 2010. – 537 p. – ISBN 978-0-470-40461-4.
9. *Wang T., Groche P.* Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (1). – P. 19. – DOI: 10.3390/jmmp3010019.
10. *Stoudt M., Hubbard J.B.* Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53 (16). – P. 4293–4304. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
11. Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования / С.А. Васильев, В.В. Алексеев, М.А. Васильев, А.А. Федорова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 71–81. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81.
12. Simulation of channel development on the surface of agrolandscapes on slopes / I.I. Maksimov, V.I. Maksimov, S.A. Vasil'ev, V.V. Alekseev // *Eurasian Soil Science*. – 2016. – Vol. 49, iss. 4. – P. 475–480. – DOI: 10.1134/S1064229316040074.
13. *Васильев С.А., Алексеев В.В., Речнов А.В.* Экспресс-метод количественной оценки пожнивных остатков на поверхности почвы // *Аграрный научный журнал*. – 2015. – № 9. – С. 11–13.
14. *Hockauf R., Grove T., Denkena B.* Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (2). – P. 40. – DOI: 10.3390/jmmp3020040.
15. *Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I.* Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer // *Engineering for Rural Development. Proceedings*. – 2018. – Vol. 17. – P. 537–542.
16. *Васильев С.А.* Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2016. – № 3. – С. 220–226.
17. *Васильев С.А.* Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2016. – № 4. – С. 40–54.
18. *Campana C., Moslehpour S.* Non contact surface roughness measurement instrumentation // *American Society for Engineering Education*. – 2007. – AC 2007-2557. – P. 12.1107.
19. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts / P. Groche, A. Zettler, S. Berner, G. Schneider // *International Journal of Material Forming*. – 2010. – Vol. 4 (4). – DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
20. *Schilling R.J.* Fundamentals of robotics: analysis and control. – New Delhi: Prentice Hall, 2005. – ISBN 81-203-1047-0.
21. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V.* Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 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/>)



Investigation of complex surfaces of propellers of vehicles by a mechatronic profilograph

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

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

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

^c  <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>,  e_a_a@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 September 2021

Revised: 02 October 2021

Accepted: 16 October 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Mechatronic profilograph

Complex surfaces

Reverse engineering

Propellers

Vehicles

Funding

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

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. The technology of investigation of screw propellers complex surfaces, which include the marine and aircraft propellers of vehicles, mechatronic profilers for the implementation of reverse engineering, is considered. A review of the scientific literature shows that at present the problem of monitoring complex surfaces of products at various stages of its life cycle requires further research, since the use of available devices and methods does not always provide the necessary accuracy, technological effectiveness and sufficient information on measurements. **The purpose of the work** is to develop a new technology for studying complex surfaces of propellers, which include marine and aircraft propellers of vehicles by means of a mechatronic profilograph to implement reverse engineering. **Methods.** The paper considers the implementation of the innovative technology for studying complex surfaces of propellers using the developed mechatronic profilograph. This ingenious mechatronic profilograph is designed to measure the profile and study the shape of complex surfaces of various products, as well as to determine the geometric and morphological parameters of these surfaces. On the basis of theoretical studies the main design and technological parameters are found and the hyperbolic dependence of the angular rate of the laser sensor movement on the scanning radius is determined for the developed mechatronic profilograph. For example, if a constant pitch of the trajectory along the Archimedes spiral is 2 mm, the value of the sensor angular rate should gradually decrease from the maximum value of 2 rad/s to the minimum value of 0.574 rad/s, i.e. by 3.484 times. **Results and discussion.** It is revealed that the use of cylindrical coordinates for processing the obtained data by a profilograph is logical and has a number of advantages. An express analysis of the propeller surfaces with rotary symmetry is carried out and differences in the shapes of the surfaces of the propeller blades by deviation values in the longitudinal and transverse directions for different radii are established. On the basis of the experimental data, a two-factor power model describing deviations with a determination coefficient of 0.967 is obtained, according to its analysis, it is clear that on average the angle of deviation in the perpendicular direction to the radius δ – increases from 0 to 0.3°, and the angle of deviation along the radius γ increases from 0 to 5.4°.

For citation: Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Fedorova A.A., Lobanov D.V. Investigation of complex surfaces of propellers of vehicles by a mechatronic profilograph. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 65–78. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-65-78. (In Russian).

References

1. Ke Y., Fan S., Zhu W., Li A., Liu F., Shi X. Feature-based reverse modeling strategies. *Computer-Aided Design*, 2006, vol. 38, iss. 5, pp. 485–506. DOI: 10.1016/j.cad.2005.12.002.
2. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing. *Measurement*, 2013, vol. 46 (7), pp. 2065–2072. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.
3. Lushnikov N., Lushnikov P. Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer. *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 20, pp. 425–429. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.

* Corresponding author

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

4. Alexander V.V., Deng H., Islam M.N., Terry F.L. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*, San Jose, CA, 2010, p. AFA3. DOI: 10.1364/CLEO_APPS.2010.AFA3.
5. Rao C.B., Raj B. Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques. *Sadhana*, 2003, vol. 28, pt. 3–4, pp. 739–761. DOI: 10.1007/BF02706457.
6. Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N. Portable non-contact surface roughness measuring device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, p. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
7. Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S. Vision system in quality control automation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144, p. 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
8. Shih F.Y. *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*. Piscataway, NJ, IEEE Press, Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 537 p. ISBN 978-0-470-40461-4.
9. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (1), p. 19. DOI: 10.3390/jmmp3010019.
10. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53 (16), pp. 4293–4304. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
11. Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Vasiliev M.A., Fedorova A.A. Razrabotka i issledovanie profilografa dlya izmereniya otklonenii formy poverkhnosti izdelii metodom lazernogo spiralevidnogo skanirovaniya [Development and research of a profile recorder for measuring deviations in the shape of the surface of products by laser spiral scanning]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 71–81. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81.
12. Maksimov I.I., Maksimov V.I., Vasil'ev S.A., Alekseev V.V. Simulation of channel development on the surface of agrolandscapes on slopes. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, iss. 4, pp. 475–480. DOI: 10.1134/S1064229316040074.
13. Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Rechnov A.V. Ekspress-metod kolichestvennoi otsenki pozhnivnykh ostatkov na poverkhnosti pochvy [Express-method of quantitative assessment of crop residues on the soil surface]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2015, no. 9, pp. 11–13.
14. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (2), p. 40. DOI: 10.3390/jmmp3020040.
15. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer. *Engineering for Rural Development. Proceedings*, 2018, vol. 17, pp. 537–542.
16. Vasiliev S.A. Razrabotka metoda i profilografa dlya otsenki meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Development of a method and the profilometer to control reclamation technologies slope agrolandscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysyshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*, 2016, no. 3, pp. 220–226.
17. Vasiliev S.A. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov profilografov dlya kontrolya meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Justification of structural and technological parameters of profilographs for reclamation technologies control on sloping cultivated lands]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*, 2016, no. 4, pp. 40–54.
18. Campana C., Moslehpour S. Non contact surface roughness measurement instrumentation. *American Society for Engineering Education*, 2007, AC 2007-2557, p. 12.1107.
19. Groche P., Zettler A., Berner S., Schneider G. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 4 (4). DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
20. Schilling R.J. *Fundamentals of robotics, analysis and control*. New Delhi, Prentice Hall, 2005. ISBN 81-203-1047-0.
21. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование напряженно-деформированного и температурного состояния режущей части инструмента с использованием лазерной интерферометрии

Игорь Ефимович^{a, *}, Иван Золотухин^b

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9060-4988>,  egor_kosin@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1517-9117>,  zolutuhinis@tyuiu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.01-02 + 531.7.08 + 620.172.21

История статьи:

Поступила: 13 сентября 2021
 Рецензирование: 28 сентября 2021
 Принята к печати: 09 ноября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Резание металлов
 Металлорежущий инструмент
 Измерение деформаций
 Лазерная интерферометрия
 Скоростная видеосъемка
 Напряженно-деформированное состояние
 Распределение напряжений
 Распределение температур
 Температурное поле
 Граничные условия
 Численные методы

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективность эксплуатации металлообрабатывающих инструментов во многом обусловлена работоспособностью их режущей части, повысить которую можно путем исследования ее напряженно-деформированного (НДС) и температурного состояния. Известные методы исследований НДС либо обладают низкой точностью, либо неприменимы для исследования в процессе работы инструментов, изготовленных из материалов, обладающих высокими механическими характеристиками. В свою очередь, исследование температурных полей с использованием известных методов вызывает большие трудности из-за малого размера рабочей зоны инструментов, высоких температур и большого температурного градиента, возникающих в процессе их работы. **Цель работы:** разработка новых экспериментальных методов исследования НДС и температурных полей режущего инструмента в процессе его работы с использованием лазерной интерферометрии. **Методы** включают в себя: получение интерференционных картин с помощью интерферометра оригинальной конструкции; регистрацию в процессе работы инструмента изменения полей поперечных деформаций его режущей части по соответствующим интерференционным картинкам, полученным с помощью высокоскоростной видеосъемки; расшифровку картин с разделением полей деформаций, вызванных нагревом и контактными нагрузками; расчет полей температур и составляющих напряжений с использованием механических характеристик и температурного коэффициента линейного расширения инструментального материала. Преимущества разработанных методов: применимость при реальных условиях эксплуатации инструмента, возможность исследования нестационарных НДС и температур в процессе работы, высокое пространственное разрешение и малая предельная площадь исследуемой поверхности. **Результаты и обсуждение.** Экспериментальное исследование подтвердило работоспособность методов. Получены поля составляющих напряжений и температур при свободном точении заготовки из жаропрочной стали резцом из твердого сплава ВК8. Разработанные методы могут быть использованы при изучении работоспособности режущей части инструментов в условиях, приближенных к реальным, а также для получения граничных условий при исследовании НДС материала заготовки в зоне обработки.

Для цитирования: Ефимович И.А., Золотухин И.С. Исследование напряженно-деформированного и температурного состояния режущей части инструмента с использованием лазерной интерферометрии // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 79–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-79-92.

Введение

Работоспособность режущих инструментов во многом обуславливает экономическую эффективность осуществляемых ими технологических операций. Найти пути повышения работоспособности позволит исследование напряженно-деформированного (НДС) и температурного со-

стояния рабочей части инструмента в условиях, максимально приближенных к реальным.

Известно большое количество разнообразных методов исследования НДС твердых тел, каждый из которых обладает особенностями, ограничивающими возможность их применения к задаче исследования НДС рабочей части инструментов. Например, использование тензометров для исследования полей деформаций весьма затруднено в случае малых размеров исследуемой зоны и высокой температуры ее нагрева. Метод разрезного (составного) резца [1] позволяет проводить исследования в реальных

*Адрес для переписки

Ефимович Игорь Аркадьевич, к.т.н., доцент
 Тюменский индустриальный университет,
 ул. Володарского, 38,
 625000, г. Тюмень, Россия
 Тел.: +7 (3452) 50-49-15, e-mail: egor_kosin@mail.ru

условиях работы, однако особенности конструкции реза [2] искажают получаемые результаты.

Метод с нанесением тензочувствительных покрытий на исследуемый объект непригоден для регистрации динамических деформаций, имеет значительные погрешности измерений и может быть использован только для качественного анализа.

Применение метода сеток [3] затруднено для высокопрочных инструментальных материалов из-за сложности определения изменений межузловых расстояний сетки, обусловленной малой деформацией этих материалов. Бесконтактный зеркально-оптический метод, использующий эффект искажения отраженных от деформируемого тела линий сетки обладает достаточной чувствительностью лишь при измерении деформаций изгиба. Метод муаровых полос весьма трудоемок в связи со сложностью получения и использования растров. Цифровая корреляция изображений [4] дает возможность автоматизировать процесс анализа результатов, но из-за относительно низкой чувствительности метода его можно использовать только для исследования деформации обрабатываемого материала.

Поляризационно-оптический метод [5] не позволяет проводить эксперименты с реальными инструментальными материалами, а из-за малой теплостойкости оптически активных материалов он может быть применен только на микроскоростях при обработке мягких материалов. Метод фотоупругих покрытий частично решает эти проблемы, однако отслаивание покрытий в зонах с высоким градиентом деформаций приводит к увеличению погрешностей измерений.

Метод отраженных теневых полос (метод отраженных каустик) [6] отличается трудоемкостью расшифровки получаемых изображений, особенно при сложноплавленном состоянии.

Метод голографической интерферометрии [7] обладает высокой чувствительностью и применим к объектам любой формы. При использовании двойной экспозиции точность измерения высокая, но отсутствует возможность регистрации непрерывных динамических процессов. При реализации метода реального времени необходима изоляция исследуемого объекта от посторонних вибраций.

Метод электронной цифровой спекл-интерферометрии [8] позволяет измерять дефор-

мации не только в направлении, нормальном к поверхности исследуемого объекта, но и в его плоскости [9]. Однако при этом разрешающая способность и минимальные размеры исследуемой поверхности значительно ограничены.

Методом лазерной интерферометрии возможна регистрация полей деформаций и напряжений, имеющих высокий градиент не только на прозрачных моделях, но и на реальных объектах. Недостатками метода являются сложность регистрации быстроизменяющихся интерференционных картин при исследовании динамических процессов и проблемы, возникающие при их расшифровке. Общим преимуществом оптических методов является бесконтактность, высокая чувствительность и безынерционность процесса измерений.

В исследованиях температурного состояния рабочей части инструмента наибольшее распространение получили контактные методы с использованием различного типа термопар. Однако с помощью искусственной термопары затруднительно измерять температуры в непосредственной близости от зоны контакта обрабатываемого материала с инструментом. Перерезаемые или «бегущие» термопары [10] можно применять лишь для определения характера распределения температур на поверхности инструмента на малых скоростях обработки. Метод полуискусственной термопары трудоемок, а использование разъемного инструмента искажает температурное поле [11]. Естественная термопара применима лишь для проводящих материалов, позволяет определять только среднее значение температуры в зоне обработки, требует предварительной тарировки и имеет низкую точность. Применение пленочных микропреобразователей на основе термометров сопротивления [12] не решает проблемы получения поля температур из-за трудности расположения большого количества датчиков на инструменте.

Методы, использующие эффект появления окисных пленок в воздушной среде (цветов побежалости) и необратимых изменений структуры материала, в том числе микротвердости, позволяют регистрировать только максимальную температуру, которая возникла в процессе эксперимента. Кроме того, изменения микроструктуры при нагреве широко используемых инструментальных твердых сплавов проявляются

незначительно. Методы термочувствительных покрытий (PVD-пленки [10] и термокраски [13]) из-за различий термофизических характеристик материала покрытий и материала исследуемого объекта, а также процессов теплопередачи между ними обладают высокой инертностью и низкой точностью измерения полей температур.

Точность методов, основанных на инфракрасной термометрии (тепловидении), во многом зависит от точности определяемого экспериментально коэффициента излучения исследуемой поверхности, который может изменяться с ростом температуры, зависит от шероховатости и степени окисления поверхности [14]. Проблема определения и учета изменения при нагреве коэффициента излучения может быть частично решена применением двухцветной термометрии [15], однако остается влияние на точность измерений качества поверхности и степени ее окисления. Из-за интерференции на окисных пленках исследуемой поверхности возникает ложный дрейф измеряемой температуры. Инфракрасная камера имеет относительно малое пространственное разрешение из-за большой длины волны теплового излучения, что затрудняет исследование малых объектов. Имеются также затруднения при измерении температуры, изменяющейся в широком диапазоне. Высокая стоимость матриц детекторов инфракрасного излучения и элементов инфракрасной оптики обуславливает ограниченность применения метода.

Метод, основанный на регистрации температурных деформаций исследуемого тела интерферометрическим способом [16], обладает малой инертностью, высоким пространственным разрешением и малой предельной площадью исследуемой поверхности. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), необходимый для преобразования деформаций в температуру, может быть определен с высокой точностью на современных дилатометрах [17] и не зависит от величины шероховатости поверхности. Недостатком метода является проблема разделения силовых и температурных деформаций при их совместном действии, а также ограничения, связанные с формой поверхности исследуемых объектов.

Постановка проблемы. В настоящее время для определения НДС и температурных полей инструментов большое распространение полу-

чили расчетные аналитические [18, 19] и численные [20] методы. В этих методах используют схематизированные силовые и тепловые нагрузки на инструмент [21, 22], полученные, как правило, аналитическим путем, а контактные процессы в зоне обработки во многом упрощаются. Повышение достоверности результатов расчетов может быть достигнуто на основе исследования контурных условий, полученных экспериментальным путем.

Рассмотренные экспериментальные методы исследований НДС и температур обладают существенными недостатками, ограничивающими их применимость и точность полученных результатов. Поэтому разработка новых экспериментальных методов исследований явлений, наблюдаемых при работе различных видов инструментов, является актуальной научной задачей.

Методика исследований

Для преодоления недостатков существующих экспериментальных методов, а также с целью максимального приближения условий эксперимента к реальным авторами разработаны новые экспериментальные методы исследований деформаций [23], температурных полей [24] и лазерно-интерферометрическая установка [25], реализующая эти методы.

Схема разработанной экспериментальной установки представлена на рис. 1. Обрабатываемый материал в форме диска 1 закреплен на вращающейся оправке 2. Исследуемый инструмент 3, установленный в державке 4, перемещается вместе с оптической частью установки в радиальном направлении с необходимой скоростью подачи S . Для получения интерференционной картины используется интерферометр, образованный полированной поверхностью 5 инструмента и оптическим клином 6, также закрепленном на державке. Источником света является лазер 7, для увеличения апертуры пучка которого применен расширитель пучка 8. Исходная поляризация луча лазера горизонтальная и он без потерь проходит через поляризованный светоделитель 9. Пройдя через четвертьволновую пластинку 10, луч меняет поляризацию на круговую с вращением против часовой стрелки. В интерферометре луч делится на рабочий и

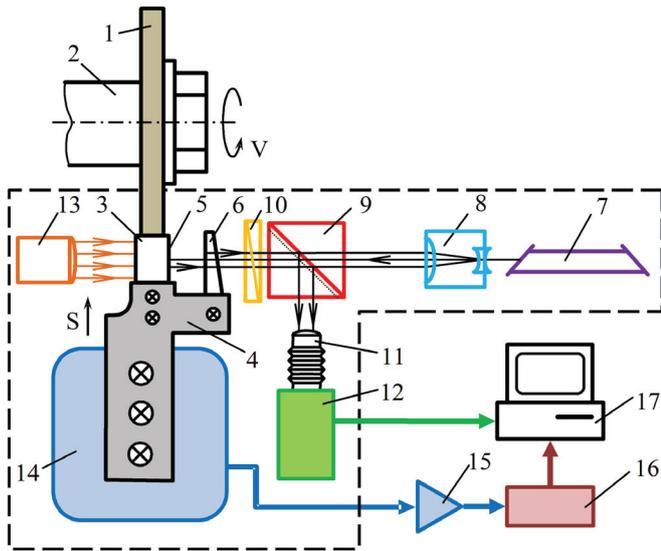


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental rig

эталонный пучок. Эталонный пучок получается в результате отражения части исходного луча от поверхности оптического клина, обращенной к инструменту. Прощедшая через оптический клин часть луча образует рабочий пучок, который освещает боковую полированную поверхность инструмента. После отражения обоих пучков их векторы поляризации получают вращение по часовой стрелке, а встретившись снова в оптическом клине, они интерферируют. Итоговый луч благодаря смене направления вращения вектора поляризации после повторного прохождения волновой пластинки приобретает вертикальную поляризацию и отражается от наклонной поверхности светоделителя в сторону объектива 11 камеры 12. С целью определения контура инструмента и обрабатываемого материала используется коллимированный источник подсветки 13. Для регистрации составляющих сил, возникающих при взаимодействии инструмента с обрабатываемым материалом, применен многокомпонентный динамометр 14 с тензоусилителем 15 и аналого-цифровым преобразователем 16. Запись видеоизображения и результатов динамометрии осуществляется в память компьютера 17.

Благодаря применению поляризованного светоделителя в виде кубика, а также четверть-волновой пластинки удалось минимизировать паразитные отражения лазерного луча, что практически устранило эффект муара и значительно снизило потери светового потока. За счет этого

значительно повысилось необходимое при скоростной съемке с малой выдержкой качество изображения регистрируемых интерференционных картин.

Экспериментальная установка смонтирована на модернизированном токарно-винторезном станке модели 163 (рис. 2). Для вращения шпинделя используется комплектный тиристорный привод главного движения КЕМТОК, что обеспечивает бесступенчатую регулировку скорости главного движения. На салазках суппорта установлена базовая плита, на которой закреплены динамометр УДМ-600 1 с державкой, два одноканальных тензоусилителя RDP 628 2 и две направляющие из станочного алюминиевого профиля. На одной направляющей установлен одномодовый одночастотный DPSS лазер LCM-S-111 3 с длиной волны 532 нм, расширитель пучка 4, а также регулируемые держатели светоделителя 5 и волновой пластинки 6 нулевого порядка. На второй направляющей установлена скоростная цифровая видеокамера Fastec HiSpec 2-HR 7 с zoom-объективом NAVITAR Zoom 6000 8. Оптический клин 9 закреплен на державке в регулируемой оправе. Все элементы оптической схемы имеют просветляющие покрытия, а конструкция державки оптимизирована для обеспечения хороших динамических характеристик динамометра. В текущем варианте реализации предлагаемые методы исследования применимы только для резания без использования смазочно-охлаждающих жидкостей.

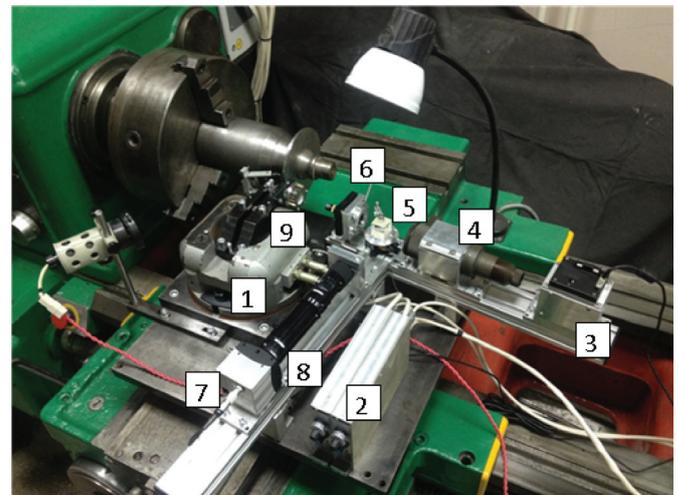


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки на токарном станке

Fig. 2. View of the experimental rig on a lathe

Получаемые на экспериментальной установке интерференционные картины несут информацию об изменениях $\Delta t_{\text{и}}$ ширины $t_{\text{и}}$ рабочей части инструмента:

$$\Delta t_{\text{и}} = \frac{1}{n} m \lambda, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления воздуха (можно с достаточной точностью принять $n = 1$); m – количество интерференционных полос, переместившихся относительно рассматриваемой точки (разность порядков интерференционных полос); λ – длина волны (для используемого лазера $\lambda = 532$ нм).

В то же время поперечная относительная деформация

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta t_{\text{и}}}{t_{\text{и}}}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем

$$\varepsilon_z = \frac{m \lambda}{t_{\text{и}}}. \quad (3)$$

Для нахождения разности порядков интерференционных полос m берутся две интерференционные картины – до нагружения и под нагрузкой, с использованием которых в интересующем сечении (например, вдоль поверхностей рабочей части) строятся соответствующие этим картинам эпюры порядков полос: m_1 и m_2 . Вычитанием построенных эпюр получают эпюру суммарного поля деформаций (силовых и температурных) $m_s = (m_2 - m_1)$. Для получения эпюры только силовых деформаций m_p из эпюры m_s вычитают эпюру тепловых деформаций m_t : $m_p = m_s - m_t$. Эпюра тепловых деформаций m_t может быть получена из интерференционной картины, зарегистрированной сразу после быстрого прекращения работы инструмента.

Из закона Гука:

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; σ_x и σ_y – составляющие нормальных напряжений.

Используя формулу (1) для случая только силового воздействия ($m = m_p$), а также формулы (2) и (4), приняв $(\sigma_x + \sigma_y) = \Theta$, можно получить

уравнение для расчета сумм составляющих напряжений Θ :

$$\Theta = -\frac{E \Delta t_{\text{и}}}{\mu t_{\text{и}}} = -\frac{E m_p \lambda}{\mu t_{\text{и}}}. \quad (5)$$

Таким образом, в результате анализа изменений интерференционных картин можно определить разность порядков полос в интересующей точке рабочей части инструмента и, используя ее, определить суммы Θ составляющих напряжений в этой точке.

Для того чтобы осуществить расчет составляющих напряжений, необходимо предварительно гармонизировать поле сумм Θ , полученных из эксперимента. Гармонизация поля сумм Θ осуществляется путем решения уравнения неразрывности в напряжениях:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) в конечных разностях для квадратной сетки (рис. 3, а) имеет вид

$$\begin{aligned} &\Theta_{J+1,N} + \Theta_{J,N+1} + \Theta_{J-1,N} + \\ &+ \Theta_{J,N-1} - 4 \cdot \Theta_{J,N} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

и для задачи гармонизации оно может быть преобразовано в

$$\begin{aligned} \Theta_{J,N} = \frac{1}{4} (\Theta_{J=1,N} + \Theta_{J,N+1} + \\ + \Theta_{J-1,N} + \Theta_{J,N-1}). \end{aligned} \quad (8)$$

После гармонизации методом итераций поля сумм Θ напряжений до требуемой точности производится расчет составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} . Наиболее удобным для расчета является расположение сетки с осью x , совмещенной с задней гранью рабочей части в виде клина (рис. 4).

В условиях свободного прямоугольного резания рабочая часть находится в плоском напряженном состоянии, которое должно удовлетворять уравнениям равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0, \quad (10)$$

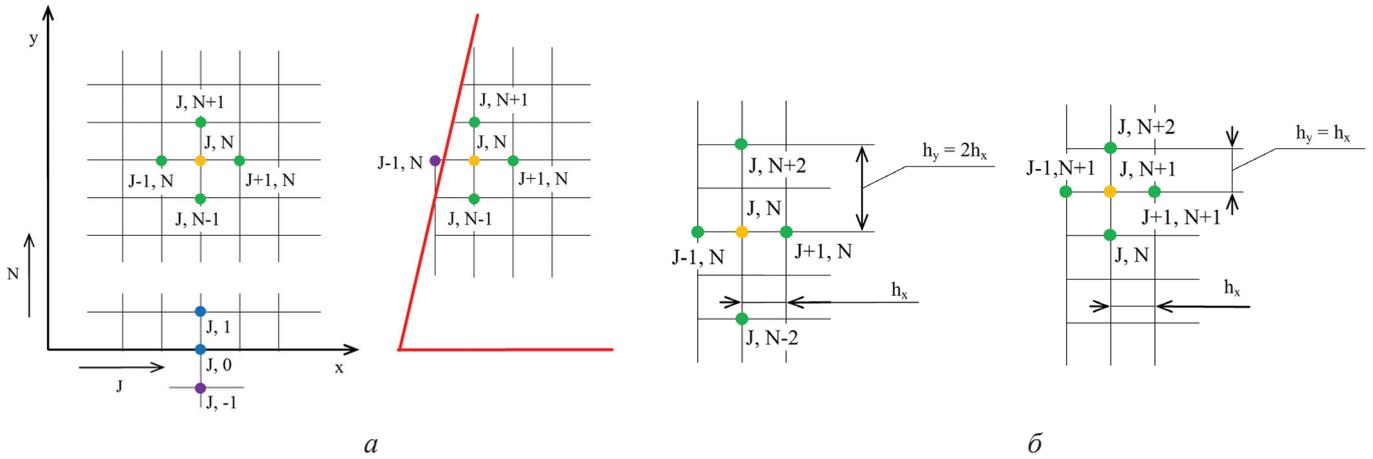


Рис. 3. Схема обозначения узлов квадратной сетки (а) и схема определения крайних точек слоя (б)
 Fig. 3. Scheme to number the nodes of the square grid (a) and scheme to end nodes of grid lines (b)

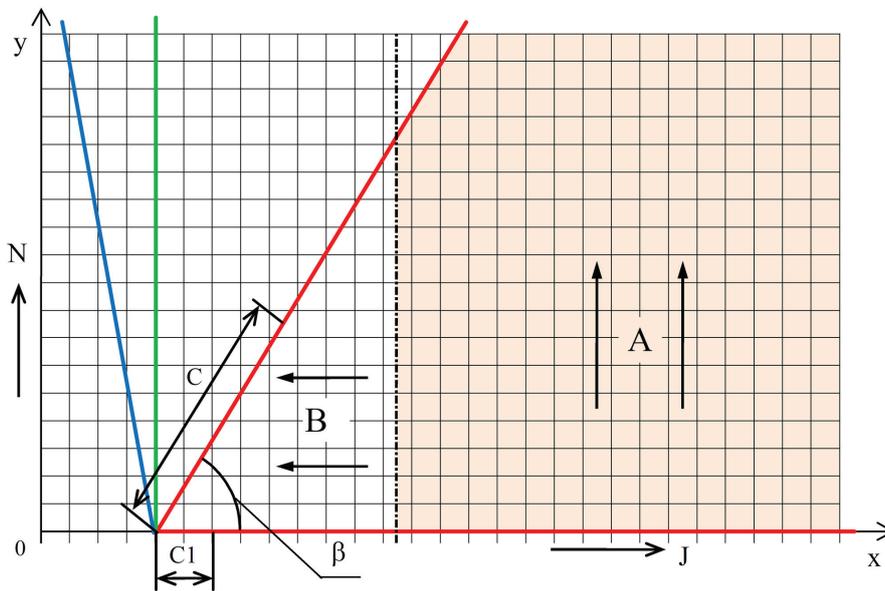


Рис. 4. Схема ориентации расчетной сетки относительно инструмента:
 C – длина контакта по передней поверхности; C1 – длина контакта по задней поверхности; β – угол заострения

Fig. 4. Scheme to grid orientation relative to the cutting tool:
 C – length of the tool in contact with the chip; C1 – length of the tool in contact with the workpiece; β – lip angle

где X, Y – составляющие объемных сил, действующих в теле инструмента.

Так как на инструмент действуют только внешние силы, то объемные силы постоянны или отсутствуют, т. е. можно принять $X = Y = 0$.

С учетом этого про дифференцируем уравнение (9) по x , а уравнение (10) по y :

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = 0. \quad (12)$$

Вычитая уравнение (11) из (12), получим:

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2}. \quad (13)$$

Преобразуем последнее уравнение, производя замену $\sigma_x = (\Theta - \sigma_y)$:

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Представим уравнение (14) в конечных разностях (положение узлов см. рис. 3, а):

$$\begin{aligned} & \sigma_{yJ+1,N} + \sigma_{yJ,N+1} + \\ & + \sigma_{yJ-1,N} + \sigma_{yJ,N-1} - 4\sigma_{yJ,N} = \\ & = \Theta_{J+1,N} - 2\Theta_{J,N} + \Theta_{J-1,N}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для экстраполяции (при послойном разделении сумм напряжений) полученное уравнение (15) необходимо преобразовать относительно членов $\sigma_{yJ,N+1}$, $\sigma_{yJ+1,N}$, $\sigma_{yJ-1,N}$, $\sigma_{yJ,N-1}$, для гармонизации – относительно члена $\sigma_{yJ,N}$. В зоне А расчет ведется от контура в тело (см. рис.4), причем для вычислений $\sigma_{yJ,N+1}$ уравнение (15) используется для слоев с $N=2$ и более.

Для расчета $\sigma_{yJ,1}$ в слое $N=1$ распишем в конечных разностях для точки $(J,0)$ уравнения (10) и (15). В результате их преобразования с учетом того, что значения σ_y и τ_{xy} на свободном контуре равны нулю, получаем уравнение

$$\sigma_{yJ,1} = \frac{1}{2}(\Theta_{J+1,0} - 2\Theta_{J,0} + \Theta_{J-1,0}). \quad (16)$$

Для нахождения значений σ_y на краях расчетного слоя представим уравнение (15) в конечных разностях с удвоенным шагом по оси y , т. е. заменив $h_y = 2 \times h_x$ (рис. 3, б, слева), и разрешим относительно члена $\sigma_{yJ,N+2}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{yJ,N+2} & = 4(\Theta_{J+1,N} - 2\Theta_{J,N} + \Theta_{J-1,N}) + \\ & + 10\sigma_{yJ,N} - 4(\sigma_{yJ+1,N} + \sigma_{yJ-1,N}) - \\ & - \sigma_{yJ,N-2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Определив значение $\sigma_{yJ,N+2}$, можно найти $\sigma_{yJ-1,N+1}$ и $\sigma_{yJ+1,N+1}$ на краях слоя $N+1$ (рис. 3, б, справа), преобразовав относительно центральной точки $(J,N+1)$ формулу (15).

Для зоны В (см. рис. 4) расчет осуществляется аналогично с учетом изменения направления движения, т. е. вместо слоев N зоны А рассматриваются слои J .

Составляющая σ_x нормальных напряжений в каждом узле определяется по формуле

$$\sigma_x = \Theta - \sigma_y. \quad (18)$$

Тангенциальная τ_{xy} , составляющая напряжений может быть определена из уравнений равновесия (11) и (12), если их расписать в конечных разностях. В зоне А

$$\begin{aligned} \tau_{xyJ,N+1} & = \tau_{xyJ,N-1} + \\ & + \tau_{xJ+1,N} - \tau_{xJ-1,N} \end{aligned} \quad (19)$$

и в зоне В

$$\begin{aligned} \tau_{xyJ-1,N} & = \tau_{xyJ+1,N} - \\ & - \tau_{yJ,N+1} + \tau_{yJ,N-1}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для первого слоя зоны А уравнение примет вид

$$\tau_{xyJ,1} = \frac{\sigma_{xJ+1,0} - \sigma_{xJ-1,0}}{2}. \quad (21)$$

Таким образом, используя формулы (15)–(21), можно осуществить разделение сумм напряжений Θ , полученных по результатам анализа изменений интерференционных картин, т. е. рассчитать составляющие напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} .

Для расчета полей температур из эпюры порядков полос m_3 , полученной сразу после вывода инструмента из зоны обработки, вычитают эпюру до нагружения m_1 (т. е. для холодного инструмента). Таким образом, получаем эпюру порядков полос $m_t = (m_3 - m_1)$ для интересующего сечения нагретого инструмента.

При наличии температурных деформаций закон Гука для плоского напряженного состояния с учетом температурных напряжений и формулы (3) можно представить в виде

$$\varepsilon_z = \frac{m_t \lambda}{t_u} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) + \alpha(T_t - T_0), \quad (22)$$

где $(T_t - T_0)$ – изменение температуры от начальной T_0 до достигнутой T_t в интересующий момент работы инструмента; $(\sigma_x + \sigma_y)$ – сумма термонапряжений; α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) инструментального материала [26].

Термонапряжения согласно результатам различных исследований обычно составляют не более 40 % величины напряжений, возникающих от действия силовых нагрузок в процессе работы инструмента. Если принять $(\sigma_x + \sigma_y) = 0$, то при черновом точении стали (например, при $T_t = 740$ К для сплава ВК8 с $\alpha = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$,

$E = 596$ ГПа, $\mu = 0,32$ и максимальным значением сумм напряжений в режущем клине ($\Theta = 1600$ МПа) составляющая деформации, вызванная термонапряжениями, не превысит 14 % от общей деформации инструмента. Поэтому температуры в узлах расчетной сетки с точностью, достаточной для инженерных расчетов, можно определить по формуле, полученной из уравнения (22):

$$T_t = \frac{m_t \lambda}{t_n \alpha} + T_0. \quad (23)$$

Предложенные методики реализованы в программах расчета составляющих напряжений и температур, написанных в среде MatLab.

Результаты и их обсуждение

Для исследования работоспособности методов проведен эксперимент, в котором осуществлялся процесс прямоугольного точения стали 1Х12Н2ВМФ (ЭИ961) резцом из твердого сплава ВК8 с задним углом $\alpha = 10$ град., передним углом $\gamma = -5$ град. со скоростью резания $V = 0,1$ м/с и подачей $S = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м/об. Интерференционные картины, полученные видеосъемкой с частотой $16 \cdot 10^3$ кадр/с, при данных условиях представлены на рис. 5.

На рис. 6 представлены эпюры порядков интерференционных полос m вдоль передней и задней поверхности инструмента (в зависимости от расстояния R от вершины рабочей части).

На рис. 7 представлены поля составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} и поле температур, полученные с использованием разработанных методик.

Анализ поля составляющей σ_x показывает, что в основном преобладают напряжения сжатия, максимальные значения которых наблюдаются на передней поверхности вблизи режущей кромки. Изменение составляющей σ_y вдоль передней поверхности имеет экстремальный характер с минимумом в зоне контакта. По мере приближения к режущей кромке составляющая σ_y увеличивается и меняет знак. Изменение касательной составляющей τ_{xy} на передней поверхности также имеет экстремальный характер. По мере приближения к режущей кромке составляющая τ_{xy} сначала уменьшается до минимального

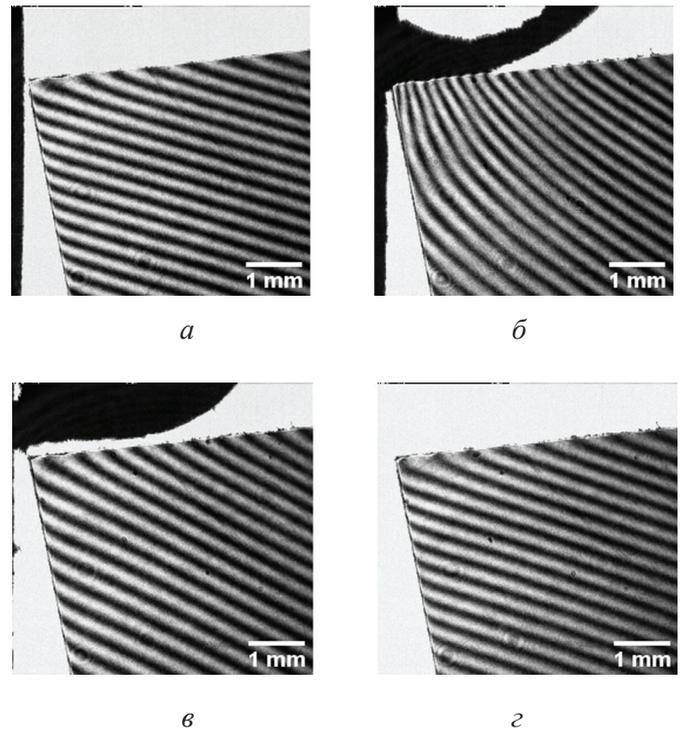


Рис. 5. Интерференционные картины (частота съемки $16 \cdot 10^3$ кадр/с):

а – до момента врезания; б – во время процесса резания (максимальная нагрузка); в – сразу после работы; г – через 1 с после работы

Fig. 5. Interference fringe patterns (camera frame rate $16 \cdot 10^3$ fps):

а – before the cutting process; б – during the cutting process (maximum load); в – immediately after the interruption of the process; г – one second after the interruption of the process

отрицательного значения, а затем увеличивается и меняет знак. В зоне контакта на задней поверхности наблюдается узкая зона отрицательных значений τ_{xy} , а вне длины контакта составляющая $\tau_{xy} = 0$.

Температурное поле отличается равномерностью. Значения температур относительно низкие из-за высокой теплопроводности твердого сплава марки ВК8 и небольшой скорости резания. Максимальная температура наблюдается на вершине резца. По мере удаления от нее температура уменьшается, при этом больший градиент наблюдается по передней поверхности.

Характер распределения температур и напряжений, полученных в результате проверки работоспособности разработанных методов, совпадает с результатами, полученными альтернативными методами в других исследованиях [1, 14].

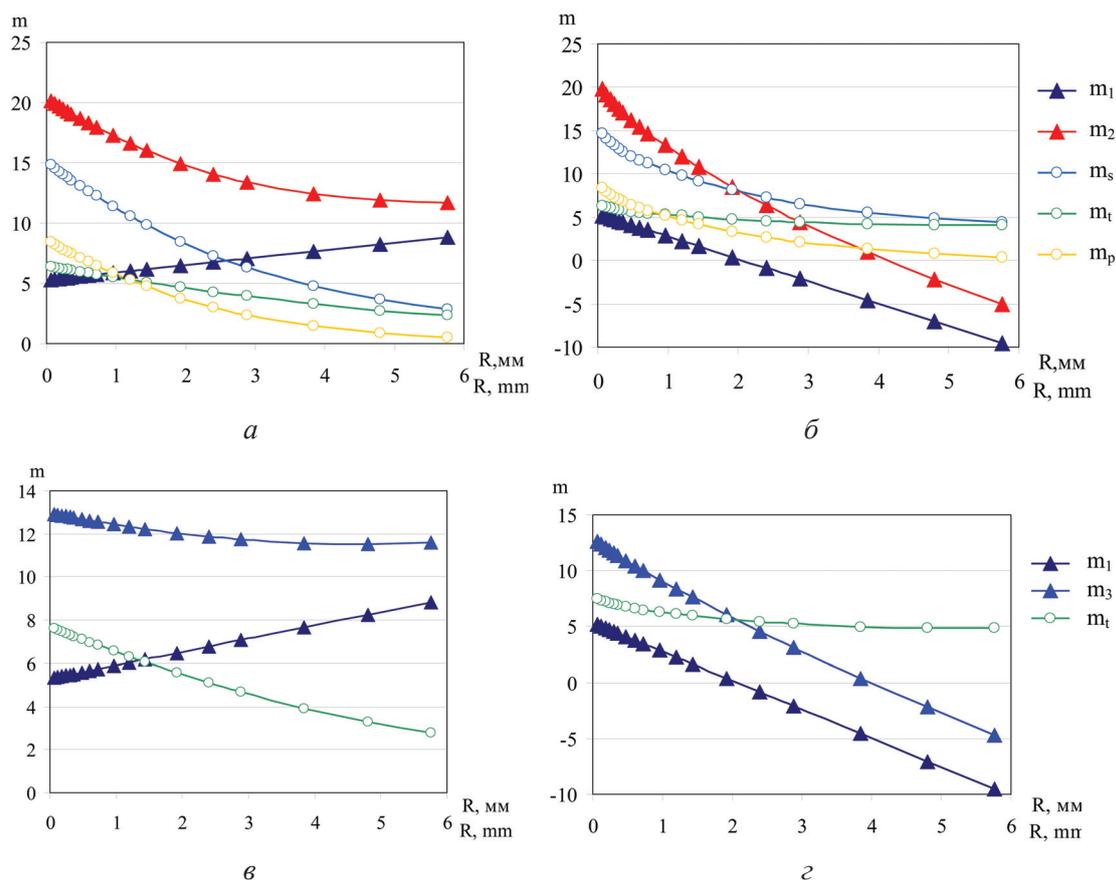


Рис. 6. Эпюры порядков полос во время процесса резания вдоль передней (а) и задней (б) поверхности; после вывода инструмента из зоны обработки вдоль передней (в) и задней (г) поверхности

Fig. 6. Fringe order distributions during the cutting process for the rake (a) and clearance (б) faces; immediately after the interruption of the process for the rake (в) and clearance (г) faces

Выводы

Разработаны новые экспериментальные методы исследований деформаций и температурных полей на базе лазерной интерферометрии, которые позволяют проводить эксперименты с реальными обрабатываемыми и инструментальными материалами в реальных условиях динамического процесса обработки.

В отличие от инфракрасной термометрии разработанный метод исследования полей температур, благодаря использованию света в видимом диапазоне спектра, обладает большим пространственным разрешением и значительно меньшей предельной площадью исследуемой поверхности. Кроме того, метод более достоверен из-за отсутствия интерференции коротковолнового излучения на окисных пленках и благодаря использованию ТКЛР для расчета температур, который в отличие от коэффициента излучения не зависит от качества

поверхности и может быть измерен с высокой точностью на современных дилатометрах.

Благодаря специальной конструкции интерферометра, использующей жестко закрепленный на державке оптический клин, удалось минимизировать отрицательное влияние вибраций – главного источника погрешностей интерферометрических методов исследований. Кроме того, применение поляризованных компонентов в оптической схеме снизило потери светового потока и значительно повысило качество регистрируемых интерференционных картин, что очень важно при скоростной видеосъемке со сверхмалой выдержкой.

Работоспособность разработанных интерферометрических методов экспериментально подтверждена при обработке высоколегированной стали 1Х12Н2ВМФ (ЭИ961) резцом из твердого сплава ВК8 с отрицательным передним углом 5° , получены поля составляющих напряжений и температур в рабочей части инструмента.

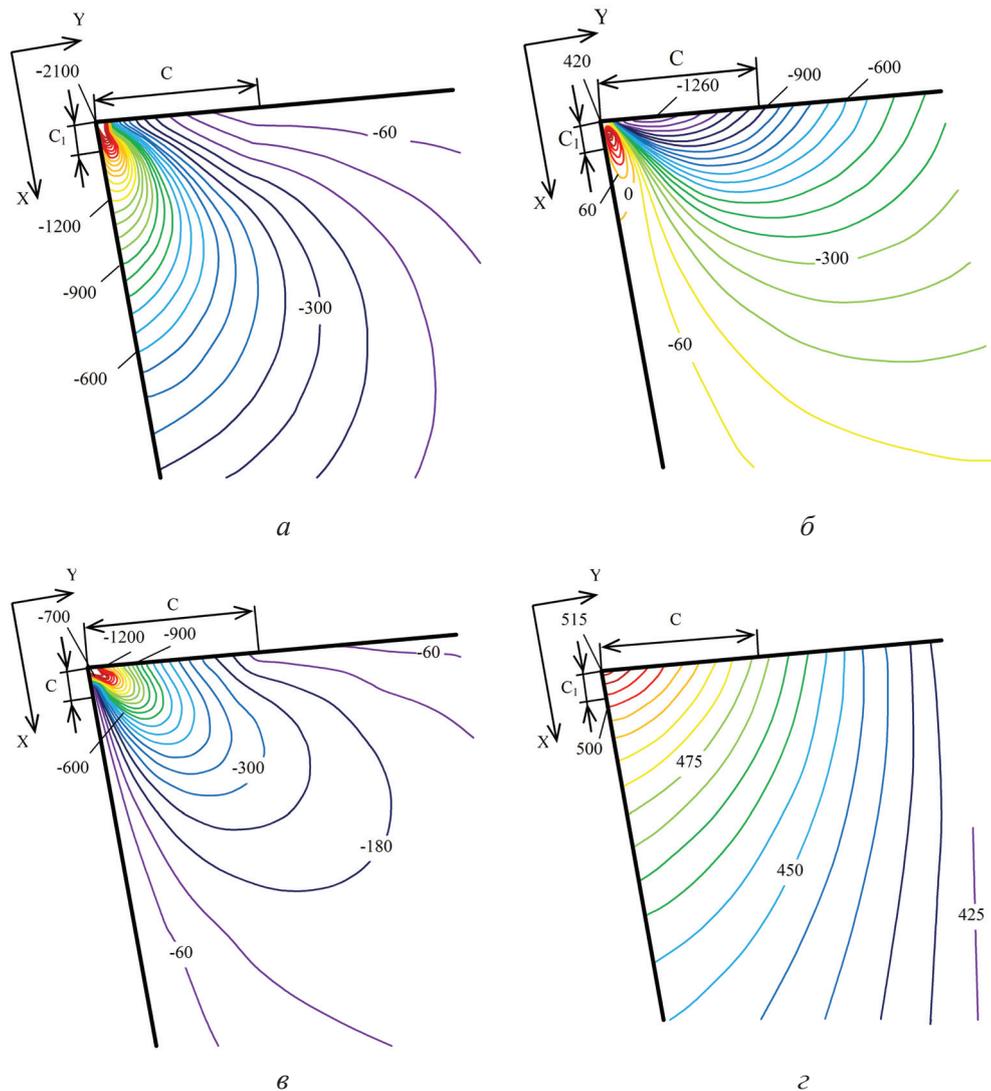


Рис. 7. Поля изолиний составляющих напряжений σ_x (а), σ_y (б) и τ_{xy} (в) в МПа и температурное поле (г) в К

Fig. 7. Distribution of stress components σ_x (a), σ_y (б), and τ_{xy} (в) in MPa and the temperature field (г) in K

Список литературы

1. Buryta D., Sowerby R., Yellowley I. Stress distributions on the rake face during orthogonal machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1994. – Vol. 34, iss. 5. – P. 721–739. – DOI: 10.1016/0890-6955(94)90054-X.

2. Laakso S.V.A., Bushlya V., Ståhl J.-E. The correct way of splitting tools – Optimization of instrument design for measuring contact stress distribution // Procedia Manufacturing. – 2018. – Vol. 25. – P. 97–102. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.062.

3. Grédiac M., Sur F., Blaysat B. The grid method for in-plane displacement and strain measurement: a review and analysis // Strain. – 2016. – Vol. 52, iss. 3. – P. 205–243. – DOI: 10.1111/str.12182.

4. Stress field analysis in orthogonal cutting process using digital image correlation technique / Z. Dong,

X.-M. Zhang, W.-J. Xu, H. Ding // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2017. – Vol. 139. – P. 031001. – DOI: 10.1115/1.4033928.

5. Ramesh K., Sasikumar S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Vol. 135. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106186.

6. Isogimi K., Kitagawa T., Kurita H. Fundamental research of stress analysis in cutting tool by means of caustics method // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 1988. – Vol. 54, iss. 2. – P. 390–395. – DOI: 10.2493/jjspe.54.390.

7. DHI contemporary methodologies: a review and frontiers / J.M. Flores-Moreno, M.D.L. Torre-Ibarra, M.D.S. Hernandez-Montes, F.M. Santoyo // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Vol. 135. – P. 106184. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106184.



8. Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: a review / I.M. De la Torre, M.D.S. Hernandez-Montes, J.M. Flores-Moreno, F.M. Santoyo // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2016. – Vol. 87. – P. 32–58. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.02.008.

9. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с. – ISBN 5-7038-2731-4.

10. Longbottom J.M., Lanham J.D. Cutting temperature measurement while machining – a review // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 2005. – Vol. 77, iss. 2. – P. 122–130. – DOI: 10.1108/00022660510585956.

11. Komanduri R.A., Hou Z.B. Review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology // *Tribology International*. – 2001. – Vol. 34. – P. 653–682. – DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00068-8.

12. Yoshioka H., Hashizume H., Shinno H. In-process microsensor for ultraprecision machining // *IEE Proceedings – Science Measurement and Technology*. – 2004. – Vol. 151, N 2. – DOI: 10.1049/ip-smt:20040375.

13. On the measurement of temperature in material removal processes / M.A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany, A.L. Cooke // *CIRP Annals*. – 2007. – Vol. 56, iss. 2. – P. 581–604. – DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.009.

14. Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process / J. Pujana, L. del Campo, R.B. Pérez-Sáez, M.J. Tello, I. Gallego, P.J. Arrazola // *Measurement Science and Technology*. – 2007. – Vol. 18, N 11. – P. 3409–3416. – DOI: 10.1088/0957-0233/18/11/022.

15. A calibrated dual-wavelength infrared thermometry approach with non-greybody compensation for machining temperature measurements / A. Hijazi, S. Sachidanandan, R. Singh, V. Madhavan // *Measurement Science and Technology*. – 2011. – Vol. 22, N 2. – P. 1–13. – DOI: 10.1088/0957-0233/22/2/025106.

16. Magunov A.N. Laser thermometry of solids. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2006. – 240 p. – ISBN 978-1-904602-12-5.

17. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures / J.D. James, J.A. Spittle, S.G.R. Brown, R.W. Evans // *Measurement Science and Technology*. – 2001. – Vol. 12. – P. R1–R15. – DOI: 10.1088/0957-0233/12/3/201.

18. Goryainov V.V., Popov M.I., Chernyshov A.D. Solving the stress problem in a sharp wedge-whaped cutting tool using the quick decomposition method and the problem of matching boundary conditions // *Mechanics of Solids*. – 2019. – Vol. 54, N 7. – P. 1083–1097. – DOI: 10.3103/S0025654419070094.

19. Analytical model of temperature distribution in metal cutting based on potential theory / F. Klocke, M. Brockmann, S. Gierlings, D. Veselovac // *Mechanical Sciences*. – 2015. – Vol. 6. – P. 89–94. – DOI: 10.5194/ms-6-89-2015.

20. Recent advances in modelling of metal machining processes / P.J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, I.S. Jawahir // *CIRP Annals*. – 2013. – Vol. 62, iss. 2. – P. 695–718. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.

21. Безъязычный В.Ф., Счерек М. Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения // *Записки горного института*. – 2018. – Т. 232. – С. 395–400. – DOI: 10.31897/PMI.2018.4.395.

22. Mathematical modelling of cutting process system / J.J. Olt, A.A. Liivapuu, O.O. Liivapuu, V.V. Maksarov, T.T. Tärkla // *Engineering Mathematics I*. – Cham: Springer, 2016. – P. 173–186. – (Springer Proceedings in Mathematics and Statistics; vol. 178). – DOI: 10.1007/978-3-319-42082-0_11.

23. Патент 2436039 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/16 (2006.01). Способ исследования деформации режущего инструмента в процессе резания / И.А. Ефимович, Е.И. Швецова. – № 2010134541/28; заявл. 18.08.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.

24. Патент 2442967 Российская Федерация, МПК G 01 K 5/48, B 23 Q 11/00 (2006.01). Способ определения температурных полей в режущей части инструмента в процессе резания / И.А. Ефимович, И.С. Золотухин, Е.И. Швецова. – № 2010134543/28; заявл. 18.08.10; опубл. 20.02.12, Бюл. № 5.

25. Патент 151653 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/16 (2006.01). Интерферометрическая установка / И.А. Ефимович, И.С. Золотухин, В.И. Ефимович. – № 2014138554/28, заявл. 23.09.2014; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10.

26. Ефимович И.А., Золотухин И.С., Завьялов Е.С. Температурный коэффициент линейного расширения вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 129–140. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Study of the stress-strain and temperature fields in cutting tools using laser interferometry

Igor Efimovich ^{a,*}, Ivan Zolotukhin ^b

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-9060-4988>, egor_kosin@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1517-9117>, zolotuhinis@tyuiu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2021

Revised: 28 September 2021

Accepted: 09 November 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Metal cutting
 Metal cutting tool
 Strain measurement
 Laser interferometry
 High-speed video recording
 Stress-strain state
 Stress distribution
 Temperature distribution
 Temperature field
 Boundary condition
 Numerical analysis

ABSTRACT

Introduction. The efficiency of the metalworking processes highly depends on the performance of the implemented cutting tools that can be increased by studying its stress-strain state and temperature fields. Existing stress analysis methods either have a low accuracy or are inapplicable for research during the operation of the tools made of materials with high mechanical properties. In addition, the study of temperature fields using known methods is difficult due to the small size of the cutting zone, high temperatures, and a heavy temperature gradient appearing during metal cutting. **The purpose** of this study is to develop new experimental methods for measuring the stress-strain and temperature fields in the cutting tool during its operation using laser interferometry. **The methods** include: obtaining interference fringe patterns using an interferometer with the original design, obtaining the tool deformation field during the cutting process by recording the changes in interference fringe patterns using a high-speed camera, processing fringe patterns with the separation of deformations caused by heating and cutting forces, and calculating temperature fields and stress distributions using mechanical properties and the coefficient of thermal expansion of the tool material. The advantages of the developed methods include: applicability under real operating conditions of the cutting tool, ability to study the non-stationary stress-strain state and temperatures during an operation, and achievement of a high spatial resolution and a small field of view for the investigated surface. **Results and Discussion.** The experimental study confirmed the efficiency of the methods. The results of the study included the fields of stresses and temperatures obtained during the orthogonal cutting of heat-resistant steel with a tool made of cemented tungsten carbide *WC-8Co*. The developed methods can be used to study the cutting tool efficiency at close to real conditions and in obtaining boundary conditions for the study stress-strain state of a workpiece material near the cutting zone.

For citation: Efimovich I.A., Zolotukhin I.S. Study of the stress-strain and temperature fields in cutting tools using laser interferometry. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 79–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-79-92. (In Russian).

References

1. Buryta D., Sowerby R., Yellowley I. Stress distributions on the rake face during orthogonal machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1994, vol. 34, iss. 5, pp. 721–739. DOI: 10.1016/0890-6955(94)90054-X.
2. Laakso S.V.A., Bushlya V., Ståhl J.-E. The correct way of splitting tools – Optimization of instrument design for measuring contact stress distribution. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 25, pp. 97–102. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.062.
3. Grédiac M., Sur F., Blaysat B. The grid method for in-plane displacement and strain measurement: a review and analysis. *Strain*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 205–243. DOI: 10.1111/str.12182.

* Corresponding author

Efimovich Igor A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Tyumen Industrial University
 38 Volodarskogo,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: +7 (3452) 50-49-15, e-mail: egor_kosin@mail.ru



4. Dong Z., Zhang X.-M., Xu W.-J., Ding H. Stress field analysis in orthogonal cutting process using digital image correlation technique. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139, p. 031001. DOI: 10.1115/1.4033928.
5. Ramesh K., Sasikumar S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 135. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106186.
6. Isogimi K., Kitagawa T., Kurita H. Fundamental research of stress analysis in cutting tool by means of caustics method. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1988, vol. 54, iss. 2, pp. 390–395. DOI: 10.2493/jjspe.54.390.
7. Flores-Moreno J.M., Torre-Ibarra M.D.L., Hernandez-Montes M.D.S., Santoyo F.M. DHI contemporary methodologies: a review and frontiers. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 135, p. 106184. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106184.
8. Torre I.M. De la, Hernandez-Montes M.D.S., Flores-Moreno J.M., Santoyo F.M. Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: a review. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, vol. 87, pp. 32–58. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.02.008.
9. Razumovsky I.A. *Interferentsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela* [Interference-optical methods of solid mechanics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 240 p. ISBN 5-7038-2731-4.
10. Longbottom J.M., Lanham J.D. Cutting temperature measurement while machining – a review. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, vol. 77, iss. 2, pp. 122–130. DOI: 10.1108/00022660510585956.
11. Komanduri R.A., Hou Z.B. Review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology International*, 2001, vol. 34, pp. 653–682. DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00068-8.
12. Yoshioka H., Hashizume H., Shinno H. In-process microsensor for ultraprecision machining. *IEE Proceedings – Science Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 2. DOI: 10.1049/ip-smt:20040375.
13. Davies M.A., Ueda T., M'Saoubi R., Mullany B., Cooke A.L. On the measurement of temperature in material removal processes. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56, iss. 2, pp. 581–604. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.009.
14. Pujana J., Campo L. del, Pérez-Sáez R.B., Tello M.J., Gallego I., Arrazola P.J. Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process. *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, no. 11, pp. 3409–3416. DOI: 10.1088/0957-0233/18/11/022.
15. Hijazi A., Sachidanandan S., Singh R., Madhavan V. A calibrated dual-wavelength infrared thermometry approach with non-greybody compensation for machining temperature measurements. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 2, pp. 1–13. DOI: 10.1088/0957-0233/22/2/025106.
16. Magunov A.N. *Laser thermometry of solids*. Cambridge, Cambridge International Science Publishing, 2006. 240 p. ISBN 978-1-904602-12-5.
17. James J.D., Spittle J.A., Brown S.G.R., Evans R.W. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, pp. R1–R15. DOI: 10.1088/0957-0233/12/3/201.
18. Goryainov V.V., Popov M.I., Chernyshov A.D. Solving the stress problem in a sharp wedge-whaped cutting tool using the quick decomposition method and the problem of matching boundary conditions. *Mechanics of Solids*, 2019, vol. 54, no. 7, pp. 1083–1097. DOI: 10.3103/S0025654419070094.
19. Klocke F., Brockmann M., Gierlings S., Veselovac D. Analytical model of temperature distribution in metal cutting based on potential theory. *Mechanical Sciences*, 2015, vol. 6, pp. 89–94. DOI: 10.5194/ms-6-89-2015.
20. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*, 2013, vol. 62, iss. 2, pp. 695–718. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.
21. Bezyazychnyi V.F., Szczerek M. Thermal processes research development in machine-building technology. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, pp. 395–400. DOI: 10.31897/pmi.2018.4.395.
22. Olt J.J., Liivapuu A.A., Liivapuu O.O., Maksarov V.V., Tärkla T.T. Mathematical modelling of cutting process system. *Engineering Mathematics I*. Cham, Springer, 2016, pp. 173–186. DOI: 10.1007/978-3-319-42082-0_11.

23. Efimovich I.A., Shvetsova E.I. *Sposob issledovaniya deformatsii rezhushchego instrumenta v protsesse rezaniya* [Method for study of cutting tool deformation in process of cutting]. Patent RF, no. 2436039, 2010.

24. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Shvetsova E.I. *Sposob opredeleniya temperaturnykh polei v rezhushchei chasti instrumenta v protsesse rezaniya* [Method for determination of temperature fields in the cutting part of the instrument in process of cutting]. Patent RF, no. 2442967, 2010.

25. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Efimovich V.I. *Interferometricheskaya ustanovka* [Interferometric rig]. Patent RF, no. 151653, 2014.

26. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Zav'yalov E.S. *Temperaturnyi koeffitsient lineinogo rasshireniya vol'framo-kobal'tovykh tverdykh splavov* [Thermal coefficient of linear expansion of tungsten-cobalt cemented carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 129–140. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства

Роман Соколов^{a,*}, Виталий Новиков^b, Камиль Муратов^c, Анатолий Венедиктов^d

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, д. 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>, falcon.rs@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1987-351X>, vitaly.nowikov2017@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>, muratows@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>, annattoliy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.24

История статьи:

Поступила: 01 июня 2021
Рецензирование: 06 августа 2021
Принята к печати: 23 сентября 2021
Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

РЭМ
Температура отпуска
Фактор разнородности
Козрцитивная сила
Внутренние напряжения
Размер зерна
Предел прочности

АННОТАЦИЯ

Введение. Контроль механических свойств конструкционных сталей является одним из основных процессов, регламентирующих срок эксплуатации оборудования. В большинстве технических процессов (обработка давлением, сварка, прокатка, термическое воздействие) происходит изменение ее структуры как в локальных областях, так и во всем объеме. Изменение структуры влечет за собой изменение свойств стали, в результате которых в локальных областях на различных этапах эксплуатации увеличивается вероятность возникновения и развития критических дефектов. Их наличие существенным образом сказываются на эксплуатационных характеристиках оборудования и приводят к преждевременному старению материала и выводу его из строя. Именно потому, что контроль механических свойств стали остается одной из актуальных проблем, разрабатываются новые методы контроля. Известно, что все свойства стали зависят от структуры вещества, однако работы по изучению влияния дисперсности рассматриваемой структуры на механические свойства представлены в незначительном объеме. **Цель работы:** проанализировать с математической точки зрения влияние фактора разнородности как параметра, отражающего дисперсности системы, на механические свойства конструкционной стали. **В работе исследованы** термообработанные образцы стали 15ХСНД, 09Г2С и Ст3, изготовленные из листового проката.

Методы исследования. Для исследования сталей 15ХСНД, 09Г2С и Ст3 в работе применялись: растровый электронный и оптический микроскопы – для изучения зеренной структуры и межзеренных границ; программный пакет SIAMS 700 – для нахождения границ и среднестатистических данных зеренной структуры; портативный рентгенофлуоресцентный анализатор металлов и сплавов X-MET 7000 – для определения химического состава исследуемых образцов в процентном отношении; разрывная машина ИР-50 – для измерения предела прочности образцов; твердомер по Виккерсу – для определения твердости образцов. **Результаты и обсуждения.** Обнаружено, что для механических свойств конструкционных сталей (твердости и предела прочности), величины внутренних напряжений и фактора разнородности наблюдается удовлетворительная корреляция, которая может быть использована для предсказания опасных состояний конструкций и времени их эксплуатации. Проведен дисперсионный и регрессионный анализ обнаруженных зависимостей. Замечено, что выпадение некоторых значений из общей регрессионной зависимости, скорее всего, может быть связано с уменьшением величины внутренних напряжений в результате уменьшения искажений кристаллической решетки стали, происходящих при термической обработке. Стоит отметить, что происходящие процессы и степень их влияния на свойства рассматриваемых конструктивных сталей могут быть различными из-за наличия в составе исследованных сталей разного количества легирующих элементов.

Для цитирования: Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 93–110. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110.

Введение

Достаточно часто в практике эксплуатации опасных производственных объектов возникает потребность в определении величины механических свойств стали для прогноза остаточного ресурса. Механические свойства являются одними из основных характеристик, к которым должны быть предъявлены жесткие требования

*Адрес для переписки

Соколов Роман Александрович, аспирант, ассистент
Тюменский индустриальный университет
ул. Володарского, 38,
625000, г. Тюмень, Россия
Тел.: 8 (919) 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

контроля, так как они напрямую определяют срок эксплуатации оборудования и металлоконструкций.

Как известно, в большей степени свойства сплавов в твердом состоянии определяются: их кристаллической структурой, химическим составом и наличием нарушений строения структуры всех видов, проявляющихся в виде неоднородностей [1]. Наличие неоднородностей структуры или химического состава приводит к отклонению заложенных в материале свойств в локальной области. Это существенно сказывается на надежности и сроке эксплуатации оборудования.

Так как эксплуатация оборудования и конструкций, изготовленных из конструкционных сталей, происходит в большинстве случаев при постоянных внешних нагрузках, которые имеют многосоставную природу, то происходит быстрая интенсификация процессов разрушения материала, приводящая к возникновению аварийных ситуаций.

В связи с высокой потребностью в способах и методах определения механических свойств сталей проводится достаточно много исследований в данном направлении [2–6]. Например, кроме разрушающих испытаний на сегодняшний день известны методы неразрушающего контроля, основанные на анализе магнитных параметров и позволяющие определить механические характеристики стали [7, 8]. В работе [7] в качестве диагностического критерия величины твердости и предела прочности предложено использовать коэрцитивную силу стали. Однако такой подход имеет свои нюансы, а именно в обнаруженных закономерностях [7] наблюдается отсутствие единой зависимости механических свойств и коэрцитивной силы для различных марок стали, что указывает на различие в структуре и свойствах фазовых составляющих, которые существенным образом влияют на формирование механических свойств и коэрцитивной силы. Кроме того, имеются методы контроля механических свойств, которые основаны на анализе распространения ультразвуковых колебаний через объект контроля [9].

Связь диагностических критериев, по которым можно судить о величине механических свойств стали и особенностях структуры стали, рассматривается уже долгое время.

Известны работы, в которых учитывают влияние дисперсности структуры (неоднородности), т. е. наличие одновременно в структуре различных по величине зерен, на механические свойства. Так, например, в работе [10] рассматривается влияние ультрамелкозернистой или мелкозернистой структуры простой углеродистой стали на предел текучести. В работе [11] со статистической точки зрения для эвтектоидной стали с ультрамелкозернистой или мелкозернистой структурой анализировался процесс накопления и появления дислокаций и его влияние на прочность стали. Изменение пластической деформации для аустенитной стали с высоким содержанием марганца и различным средним размером зерна отражено в работе [12]. В работе [13] была проведена оценка влияния развития субструктуры на поведение деформационного упрочнения стали Fe – 17,5Mn–8,3Al–0,74C–0,14Si. Было отмечено, что субструктуры при измельчении вносят существенные изменения в прочностные свойства.

Внутризеренная неоднородность ориентации и напряженного состояния выделены как важные области для будущих исследований в работе [14].

Кроме работ, в которых исследования проводились на сплавах, полученных обычными металлургическими способами, имеются работы [15, 16], в которых исследуемые образцы были получены аддитивным способом. В таких работах рассматривалось влияние микроструктурных особенностей, а именно дескрипторов мезоструктуры, которые описывают особенности мезоструктурной неоднородности на механические свойства с точки зрения количественной оценки.

Несмотря на то что в перечисленных выше работах проведен некоторый статистический анализ влияния структурной неоднородности на механические свойства, в них отсутствует проверка выдвинутых в качестве результатов зависимостей.

В данной работе рассматривается влияние, оказываемое дисперсностью структуры не только на значение предела прочности, но и на величину коэрцитивной силы и внутренних напряжений конструкционных сталей 15ХСНД, 09Г2С, Ст3. Оценка влияния производится на основе анализа корреляционных зависимостей между

пределом прочности, коэрцитивной силой, величиной внутренних напряжений и фактором разноточности, выступающим в качестве критерия дисперсности структуры.

Исследуемые конструкционные стали имеют широкое применение для изготовления различных металлоконструкций, трубопроводного транспорта, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Для определения наличия взаимосвязи между рассматриваемыми величинами необходимо: проанализировать влияние термообработки на величину коэрцитивной силы, предела прочности, внутренних напряжений, фактора разноточности; определить наличие корреляционной зависимости между данными параметрами; объяснить изменения, происходящие с ними при термообработке.

Методика исследований

Образцы из сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД размером 4,0×70,0×25,0 мм были вырезаны лазером из листов вдоль направления их прокатки. Данные о химическом составе определены анализатором X-MET 7000. В табл. 1 приведены усредненные значения, полученные при проведении 10 измерений.

Как известно, термическая обработка сильно сказывается на структурно-фазовом составе стали, а так как неоднородности в механических и магнитных свойствах стального проката, из которого изготовлены образцы, обычно не пре-

вышают 15 % [17], то для создания различных вариаций структуры, а следовательно, и зернового состава необходимо провести термообработку экспериментальных образцов. Поэтому перед проведением исследований образцы подвергались закалке с последующим отпуском при различных температурах (табл. 2). Это было сделано для создания различных вариаций структурно-фазового состояния.

Микроструктура исследуемых образцов была изучена при помощи растрового электронного микроскопа JEOL 6008А. В качестве травителя использовался 3 %-й раствор азотной кислоты.

Определение величины фактора разноточности производилось по формулам, представленным в работах [18, 19], где используется распределение баллов зерен наблюдаемых на микрошлифе.

Для расчета фактора разноточности выполнялась обработка микрофотографий (рис. 1) в программном комплексе металлографических исследований «SIAMS 700» (рис. 2). В качестве примера на рис. 3 показано распределение балла зерен образца стали 15ХСНД. Аналогичный характер имеют распределения остальных образцов.

Балл зерна определялся в соответствии с ГОСТ 5639–82 [21]. Расчет фактора разноточности F_z производился по формуле

$$F_z = \frac{f_{\max} Z_{\max}}{\sum f_i Z_i}, \quad (1)$$

Таблица 1

Table 1

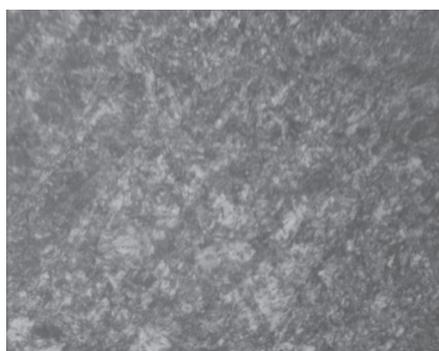
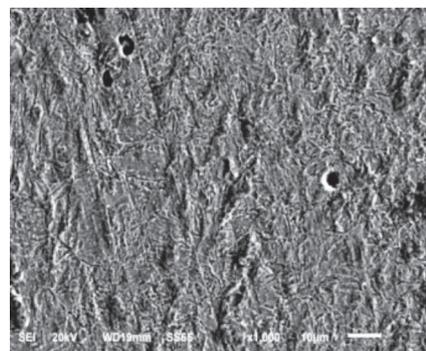
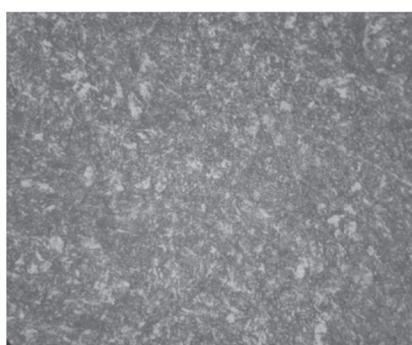
Химический состав исследуемых сталей
Chemical composition of the studied steels

Марка стали/ Steel grade	Содержание элемента, % масс / Element content, % wt							
	C	Si	P*	S*	Cr	Mn	Ni	Cu
09Г2С/ 09G2S	0,11	0,15	0,05	<0,028	0,07	1,91	0,11	0,22
Ст3/ St3	0,16	0,15	0,05	<0,02	0,03	0,45	0,03	0,04
15ХСНД/ 15KhSND	0,16	0,71	0,06	<0,02	0,84	0,79	0,34	0,20

* Показатели содержания углерода, серы и фосфора приведены согласно информации, указанной в сертификатах качества на стали, из которых изготовлены образцы / The indicators of the content of carbon, sulfur and phosphorus are given according to the information specified in the quality certificates on the steel from which the samples are made.

Термическая обработка исследуемых образцов
Heat treatment of the test samples

Марка стали/ Steel grade	Термическая обработка / Heat treatment
09Г2С/ 09G2S	Нагрев до 930±20 °С, закалка в воде Отпуск при 200, 350, 500, 650 °С в течение 1 часа, охлаждение на воздухе / Heating up to 930 ± 20 °С quenching in water Tempering at 200, 350, 500, 650 °С for 1 hour, air cooling
Ст3/ St3	Нагрев до 930±20 °С, закалка в воде Отпуск при 200, 350, 500, 650 °С в течение 1 часа, охлаждение на воздухе / Heating up to 930 ± 20 °С quenching in water Tempering at 200, 350, 500, 650 °С for 1 hour, air cooling
15ХСНД/ 15KhSND	Нагрев до 930±20 °С, закалка в воде Отпуск при 200, 300, 350, 400, 500, 550, 650 °С в течение 1 часа, охлаждение на воздухе / Heating up to 930 ± 20 °С quenching in water Tempering at 200, 300, 350, 400, 500, 550, 650 °С for 1 hour, air cooling


a

б

в

г

Рис. 1. Структура термообработанных образцов стали 09Г2С при 1000-кратном увеличении в оптическом и растровом электронном микроскопах:

a – структура закаленного при температуре 950 °С образца в оптическом микроскопе; *б* – структура закаленного при температуре 950 °С образца в растровом электронном микроскопе; *в* – структура образца при отпуске 350 °С в оптическом микроскопе; *г* – структура образца при отпуске 350 °С в растровом электронном микроскопе

Fig. 1. Structure of heat-treated steel samples 09G2S at 1,000x magnification in optical and scanning electron microscopes:

a – the structure of the sample quenched at a temperature of 950 °С, studied using an optical microscope; *б* – the structure of the sample quenched at a temperature of 950 °С, studied using a scanning electron microscope; *в* – the structure of the sample after tempering at 350 °С, studied using an optical microscope; *г* – the structure of the sample after tempering at 350 °С, studied using a scanning electron microscope

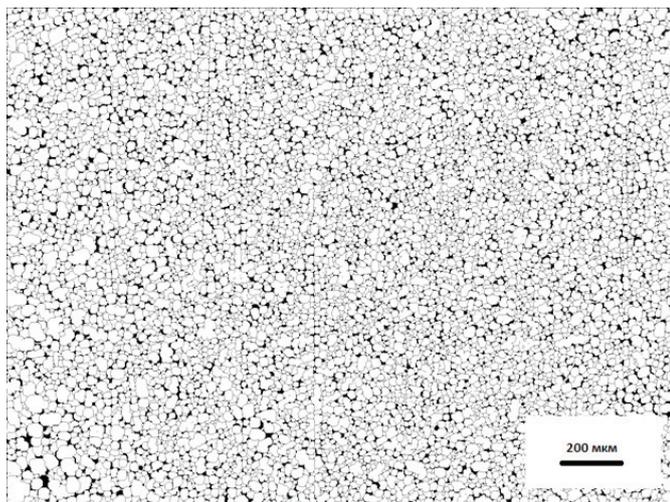


Рис. 2. Микроструктура нагретого до 930 °С и закаленного в воде образца, изготовленного из проката стали 09Г2С, полученная при обработке микрофотографий в программном комплексе SIAMS 700

Fig. 2. Microstructure of a sample heated to 930 °C and quenched in water, made of rolled steel 09G2C, obtained by processing microphotographs in the SIAMS 700 software package

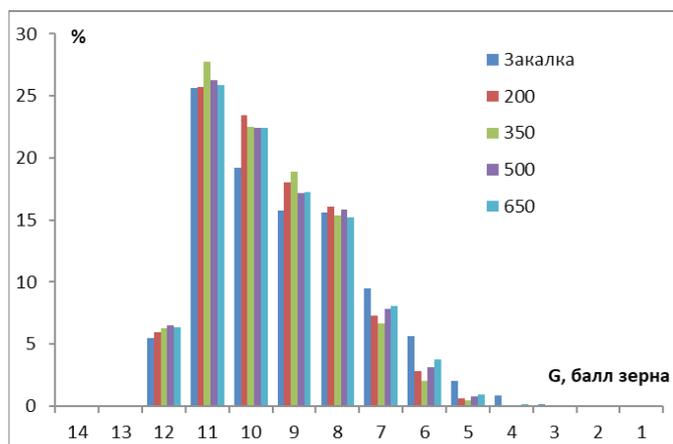


Рис. 3. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали 15XCHD по размеру зерна [20]

Fig. 3. Histogram of the percentage distribution of grains by points for micro-sections of heat-treated samples made of 15KhSND steel by grain size [20]

где f_i – доля зерен с определенным баллом, %; f_{\max} – доля зерен, занимающих максимальную площадь на шлифе, %; Z_i – балл зерна; Z_{\max} – балл зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

Результаты и их обсуждение

Значения величины фактора разноразности, полученные в работе [20], представлены на рис. 4. Можно заметить, что наибольшее значение в величине фактора разноразности наблюдается у образца с температурой отпуска 200 °С, что, скорее всего, связано с начавшимся процессом нарушения когерентности решетки мартенсита и цементита [22–24] в результате начала процессов выделения углерода [24, 25]. При течении данных процессов в материале образуется область с обедненной углеродом фазой, которая обладает низкой твердостью, а также новая фаза в виде феррита и цементита. Происходит дробление фазы мартенсита, что приводит к росту числа зерен с более высоким баллом.

Величина внутренних напряжений определялась согласно методике [26] путем сравнения полученных на исследуемых образцах данных с данными эталонного образца, в качестве которого использовали отожженный образец. Полученные результаты представлены на рис. 5 [25]. Для снятия рентгеновских дифрактограмм использовался автоматический рентгеновский дифрактометр общего назначения ДРОН-7.

При помощи разрывной машины ИР-50 были получены диаграммы напряжения–деформация. При анализе уточнялись данные о величине временного сопротивления исследуемых материалов, подвергаемых различной термической обработке (рис. 6).

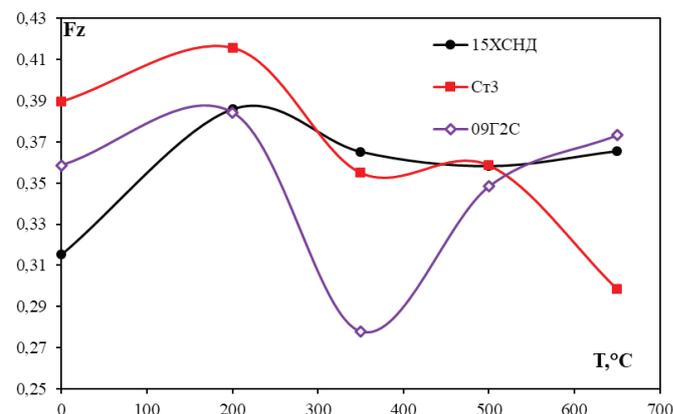


Рис. 4. Изменение величины фактора разноразности F_z для образцов из стали 15XCHD при различной термообработке [20]

Fig. 4. Change in the value of the factor of different grain size F_z for samples made of 15KhSND steel with different heat treatment [20]

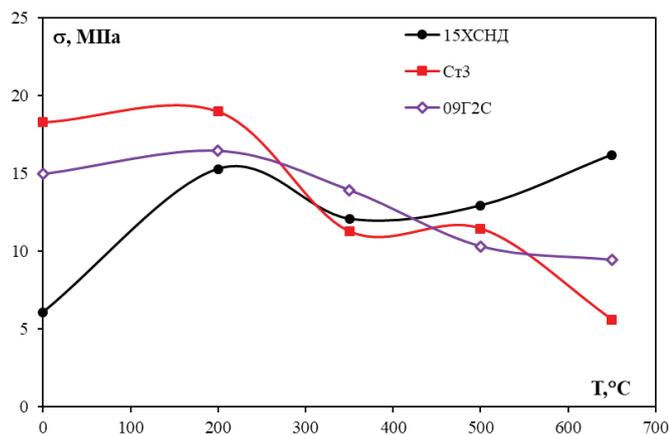


Рис. 5. Зависимость изменения величины внутренних напряжений от температуры отпуска конструкционных сталей

Fig. 5. Dependence of the change in the magnitude of internal stresses on the tempering temperature of structural steels

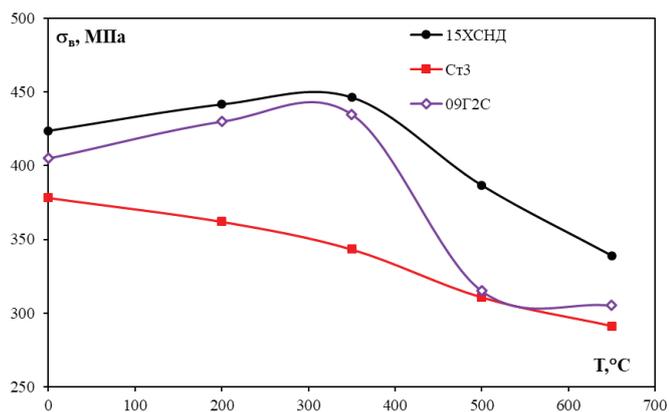


Рис. 6. Зависимость изменения величины предела прочности от температуры отпуска конструкционных сталей

Fig. 6. Dependence of the change in the value of the ultimate strength on the tempering temperature of structural steels

Структуроскопом КРМ-Ц-К2М была определена величина коэрцитивной силы (рис. 7), которая монотонно убывает с увеличением температуры отпуска. Это связано с изменениями, происходящими в структурно-фазовом составе сталей. В работе [27] отмечается, что изменения коэрцитивной силы связаны с процессами распада мартенситной структуры и нахождением цементитных составляющих в различных магнитных состояниях.

Известны работы [28, 29], в которых для определения структурных изменений использо-

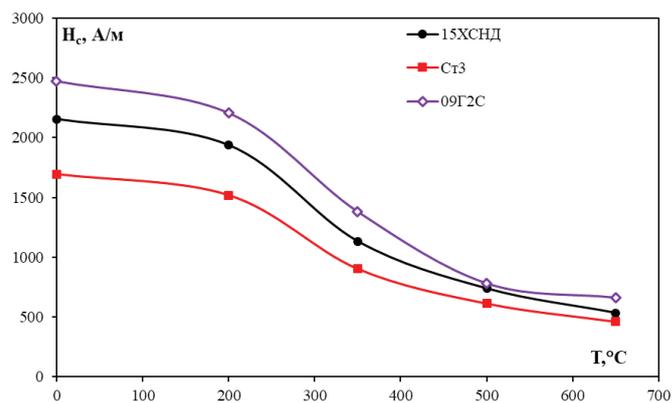


Рис. 7. Зависимость коэрцитивной силы от температуры отпуска исследуемых сталей

Fig. 7. Dependence of the coercive force on the tempering temperature of the steels being studied

вались магнитные параметры стали: коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, релаксационная коэрцитивная сила, дифференциальная магнитная проницаемость и др.

Наличие установленной экспериментально корреляционной зависимости между магнитными свойствами ферромагнетика, структурой и механическими свойствами можно проследить в работе [30]. Однако стоит отметить, что подобного рода закономерности определяются только для определенного класса сталей, например углеродистых сталей 30, 35, 45, У8, У10, У12, подвергнутых закалке и отпуску при разных температурах [31]. В работе [29] показано значительное влияние термической обработки на структуру и свойства стали, которое можно рассмотреть на примере коэрцитивной силы и твердости.

При анализе взаимосвязи корреляционных зависимостей магнитных и механических свойств для сталей, относящихся к различным группам, зависимости перестают носить общий прямой характер, и зачастую определение интересующих свойств производить затруднительно. Это связано с тем, что формируемые при термической обработке структуры и их характеристики (например, количество, распределение и свойства мартенсита, остаточного аустенита, карбидов и т. д.) в большей степени зависят от взаимодействия легирующих элементов, которые входят в состав стали, их процентного содержания, включая углерод, а также характера и величины температурных воздействий [32].

Для понимания влияния дисперсности структуры на магнитные и механические свойства стали необходимо произвести оценку методом статистического и регрессионного анализа. На рис. 8–10 представлены полученные в лабораторных условиях зависимости фактора разнотерности от различных параметров, характеризующих свойства стали. Кроме того, на графиках приведены предсказанные значения для Y -величины фактора разнотерности, рассчитанного по величине внутренних напряжений.

Проведенный регрессионный анализ для представленных на рис. 8 [33, 34] данных позволил получить информацию о регрессионной статистике, основные показатели которой приведены в табл. 3.

R -квадрат, или коэффициент детерминации, в анализируемой модели равен 0,885, что говорит о том, что используемые для проведения анализа параметры имеют зависимость, которая с вероятностью 88,5 % может быть объяснена при использовании предложенной модели. Так как коэффициент детерминации больше 0,5, то обнаруженная зависимость считается удовлетворительной.

ε – стандартная ошибка регрессионной модели. Данная величина показывает, насколько предсказания значений переменной Y не соответствуют истинному значению. Обычно допу-

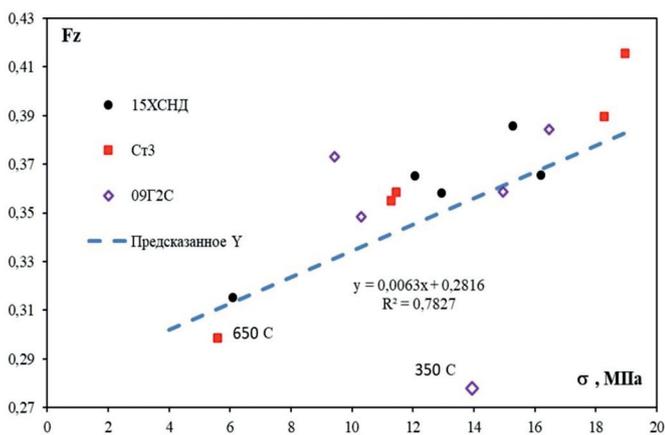


Рис. 8. Величина фактора разнотерности F_z в зависимости от величины внутренних напряжений (напряжений второго рода) для термообработанных образцов, изготовленных из конструкционных сталей

Fig. 8. The value of the grain size factor F_z depending on the value of internal stresses (stresses of the second kind) for heat-treated samples made of structural steels

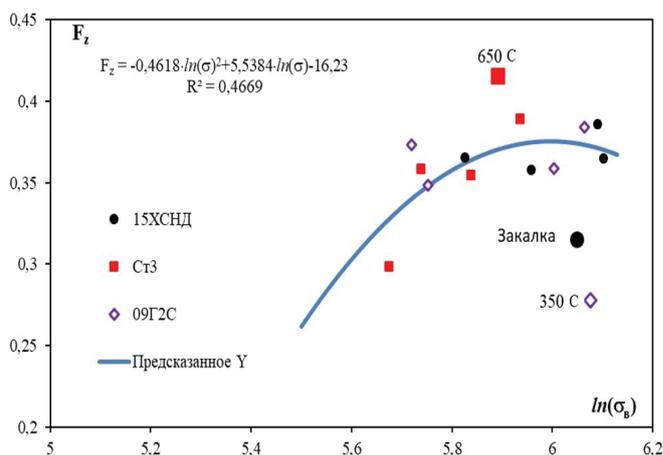


Рис. 9. Величина фактора разнотерности F_z в зависимости от логарифма величины предела прочности для термообработанных образцов, изготовленных из конструкционных сталей

Fig. 9. The value of the factor of different grain size F_z depending on the logarithm of the ultimate strength value for heat-treated specimens made of structural steels

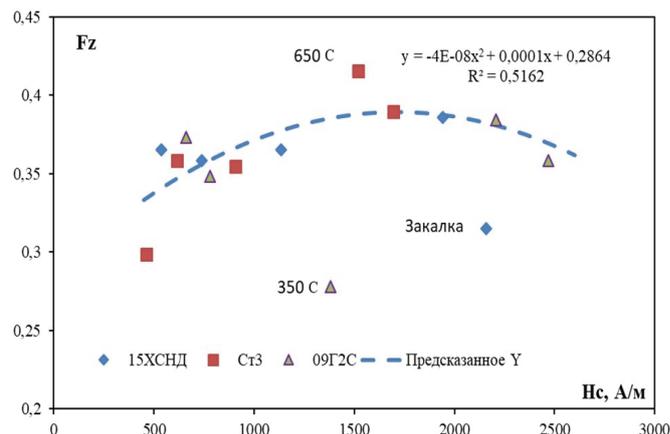


Рис. 10. Величина фактора разнотерности F_z в зависимости от величины коэрцитивной силы для термообработанных образцов, изготовленных из конструкционных сталей

Fig. 10. The value of the factor of different grain size F_z depending on the value of the coercive force for heat-treated specimens made of structural steels

стимые границы, определенные на основе ε , лежат в пределах $\pm 2 \dots 3$ значений.

В таком случае уравнение, характеризующее линейную регрессионную модель, примет вид

$$Y = aX + \beta \pm \varepsilon. \tag{2}$$

В рассматриваемом случае $\varepsilon = 0,014$ показывает, насколько велика ошибка предсказания одной величины от другой. Исходя из величины ε ука-

Таблица 3

Table 3

Регрессионная статистика
Regression statistics

Множественный R Multiple R	0,885
R -квадрат R -square	0,783
Нормированный R -квадрат Normalized R -square	0,765
Стандартная ошибка Standard error	0,014
Наблюдения Observations	14

жем на диаграмме границы предсказания, которые определяются как

$$G = \hat{Y}_i \pm 2\varepsilon, \quad (3)$$

где \hat{Y}_i – предсказанная величина Y .

При величине $\pm 2\varepsilon$ 95 % точек данных должны располагаться в пределах этих определенных границ.

Адекватность предложенной линейной регрессионной модели можно проверить с помощью исследования остатков модели, которые определяются для каждого X как

$$U_i = Y_i - \hat{Y}_i. \quad (4)$$

График зависимости остатков от предсказанных значений Y представлен на рис. 11. Для по-

добных графиков необходимым условием, которое характеризует адекватности анализируемой зависимости, является отсутствие характерных «паттернов» (шаблонов) неравномерного распределения в зависимости от значений Y . Для зависимости, проставленной на рис. 11, в расположении облака точек не наблюдается явных шаблонов, что может говорить нам о правильности найденной линейной регрессии.

В табл. 4 приведены величины, необходимые для проведения регрессионного анализа. Коэффициент Y_{II} соответствует значению Y при условии, что все переменные в рассматриваемой модели равны 0. Это означает, что в модели не

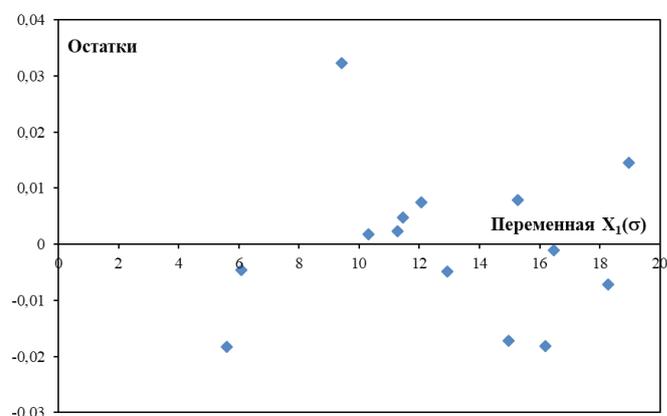


Рис. 11. Зависимость остатков для величины внутренних напряжений, полученной для сталей различных марок от твердости при различной термообработке образцов

Fig. 11. Dependence of the residuals for the magnitude of the internal stresses obtained for steels of different grades on the hardness at different heat treatment of samples

Таблица 4

Table 4

Данные, полученные при регрессионном анализе

Data obtained from regression analysis

Параметры	Коэффициенты / Coefficients	Стандартная ошибка / Standard error	t -статистика/ t -statistics	P -Значение/ P -value
Y_{II}	0,282	0,013	21,908	4,8E-11
X_{III}	0,006	0,001	6,574	2,64E-05
	Нижние 95 % / Low 95%		Верхние 95 % / High 95 %	
Y -пересечение / Y -intersection	0,254		0,309	
Переменная X 1 / Variable X 1	0,004		0,008	

учитываются влияния, оказываемые другими факторами на анализируемые параметры. X_{III} – показывает весомость переменной X над Y , т. е. внутренние напряжения в пределах данной модели влияют на фактор разнотерности с весом 0,0063. Знак перед числом указывает на влияние, оказываемое на фактор разнотерности: чем больше внутреннее напряжение, тем больше величина фактора разнотерности.

Кроме того, представлены величины для переменной Y при пересечении оси X при доверительном интервале 0,95.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа полученных данных [35–37] представлен в табл. 5, где SS – это сумма квадратов отклонений; df – степень свободы; графа MS – средний квадрат; F – критерий фактического F -распределения.

Таблица 5

Table 5

Результаты однофакторного дисперсионного анализа
Results of one-way analysis of variance

Дисперсионный анализ / ANOVA					
Результаты анализа / Analysis results	df	SS	MS	F	Значимость F / Significance of F
Регрессия / Regression	1	0,009	0,009	43,214	2,64E-05

На основе сравнения дисперсии, обусловленной межгрупповым разбросом, и дисперсии, обусловленной внутригрупповым разбросом, была проведена проверка статистической значимости. Полученные внутригрупповые дисперсии сравнивались с помощью F -критерия, который определяет, статистически значимо ли различие между средними значениями и действительно ли отношение дисперсий больше единицы. Значимость F показывает наличие разницы между средними величинами. Так как эта величина незначительна, то был сделан вывод, что нулевая гипотеза о наличии корреляционной зависимости между фактором разнотерности и поверхностной твердостью стали имеет место.

При помощи дисперсионного анализа также была произведена проверка гипотезы о наличии влияния рассматриваемых параметров друг на друга. Для этого было проанализировано несколько выборок значений фактора разнотерности, полученных для образцов с различной термической обработкой. Выборки содержали равное число элементов.

На рис. 12 приведены статистические характеристики исследуемого набора данных. Выборки 1 и 2 представляют собой набор значений фактора разнотерности, полученный при нескольких обработках снимков микроструктуры для различных значений предела прочности.

Выборка 3, в отличие от 1 и 2, получена при определении балла зерна по его площади.

Из блочной диаграммы видно, что выбор метода расчета фактора разнотерности не оказывает существенного влияния на наличие взаимосвязи между данной величиной и величиной внутренних напряжений. Однако различие в средних значениях выборок может быть обусловлено лишь случайностью, поэтому статистически обоснованный вывод о наличии однозначного влияния рассматриваемых факторов друг на друга не может быть сделан.

Величина дисперсии (разброс данных) для рассматриваемых выборок имеет приблизительно одинаковое значение, что является одним из основных условий, определяющих корректность применения метода дисперсионного анализа.

Анализ тестовой статистики, которая в рассматриваемом случае имеет вид F -распределения, или распределения Фишера, представлена на рис. 13.

Полученное для анализируемой зависимости среднее значение F -распределения, которое характеризуется 13 и 28 степенями свободы, равно 1,08. Критерием отклонения или принятия нулевой гипотезы в таком случае выступает значение F_0 , которое равно 4,915. Вероятность p , что случайная величина, имеющая распределение Фишера для анализируемой зависимости, примет значение 5,3358 или более, составляет 0,00034.

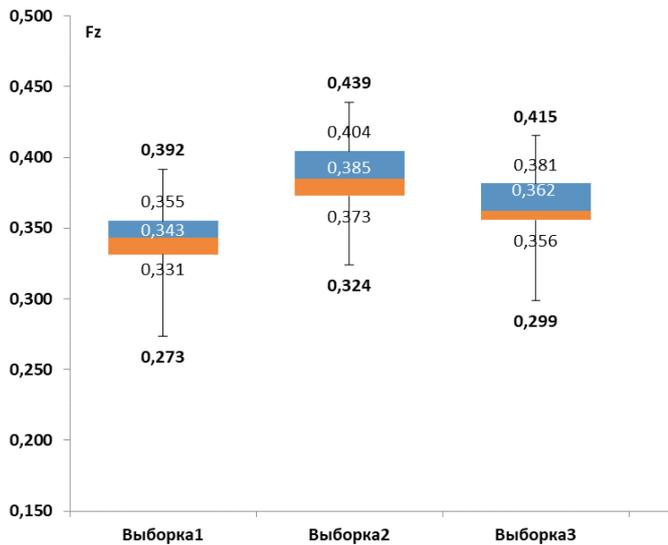


Рис. 12. Блочная диаграмма, полученная при анализе выборок величины фактора разнорзерности, полученных при различной оценке величины зерна

Fig. 12. A block diagram obtained by analyzing samples of the value of the grain size factor obtained with different estimates of the grain size

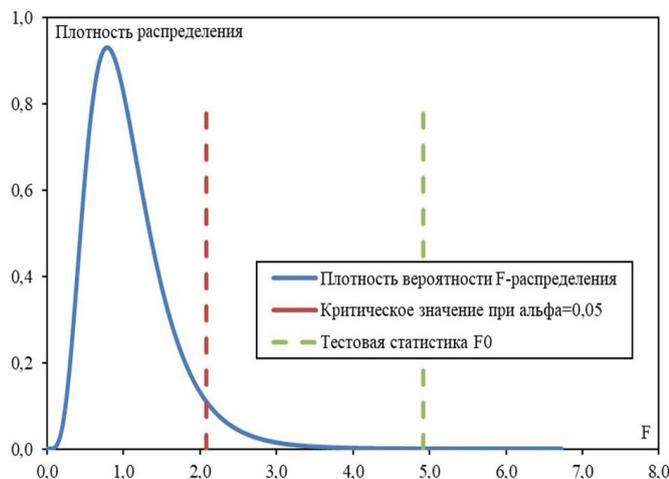


Рис. 13. Тестовая статистика, полученная на основе анализа рассматриваемых выборок

Fig. 13. Test statistics obtained from the analysis of the samples under consideration

При сравнении с уровнем значимости 0,05 видно, что p значительно меньше его, что говорит о том, что нулевая гипотеза отклонена, и различие средних значений по анализируемым выборкам не может быть объяснено лишь случайностью. Таким образом, можно сделать вывод, что средние значения по выборкам статистически значимо отличаются друг от друга, и рассматриваемая

модель (зависимость) является статистически обоснованной.

Для зависимостей, представленных на рис. 8 и 9, был проведен анализ, описанный выше.

На рис. 14 и 15 представлены распределения Фишера, полученные при анализе зависимостей $\ln(\sigma)$ и H_c .

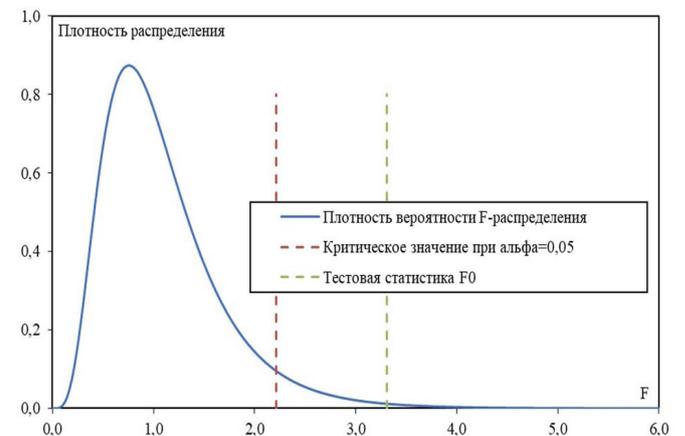


Рис. 14. Тестовая статистика, полученная на основе анализа рассматриваемых выборок, полученных для $\ln(\sigma)$

Fig. 14. Test statistics obtained from the analysis of the considered samples obtained for $\ln(\sigma)$

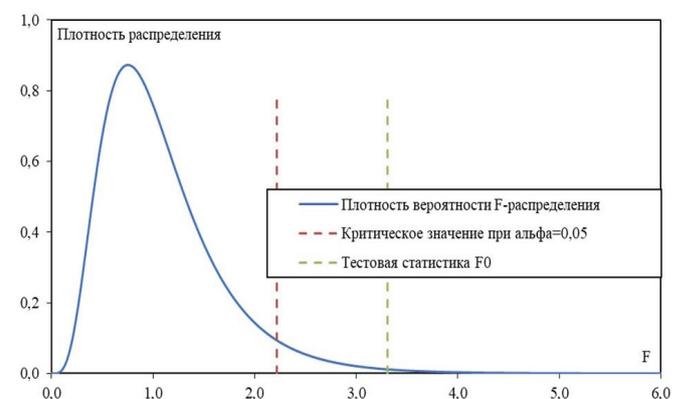


Рис. 15. Тестовая статистика, полученная на основе анализа рассматриваемых выборок, полученных для H_c

Fig. 15. Test statistics obtained from the analysis of the considered samples obtained for H_c

При анализе критериев для данных зависимостей, так же как и в предыдущем случае, средние значения по выборкам статистически значимо отличаются друг от друга, и рассматриваемая модель (зависимость) является статистически обоснованной.

Представленные на рис. 8...10 зависимости с высокой долей вероятности могут быть описаны с помощью линейной (в случае внутренних напряжений) и полиномиальной кривой. Наличие таких зависимостей говорит о том, что в механизме формирования как предела прочности внутренних напряжений, так и коэрцитивной силы рассматриваемых сталей значительную роль играет дисперсность системы (фактор разнотерности). Наблюдаемые выпадения точек из обнаруженных для исследуемых сталей зависимостей происходят для образцов с различной термической обработкой, что в большей степени обусловлено резкими изменениями в структурно-фазовом составе сталей. Следует отметить, что выпадение точек из обнаруженных зависимостей происходит при одних и тех же температурах: для образцов из стали 15ХСНД – образец с закалкой в воде; для образцов из стали Ст3 – образец с отпуском при 650 °С; для образцов из стали 09Г2С – образец с отпуском при 350 °С, что может свидетельствовать о наличии влияния дисперсности структуры на рассматриваемые свойства.

Как отмечалось выше, наблюдаемые выпадения экспериментальных значений из обнаруженных регрессионных зависимостей могут быть объяснены с позиции влияния других параметров структуры и фазы на рассматриваемые величины.

Изучение микроструктуры исследуемых образцов и анализ информации о величинах внутренних напряжений позволили в какой-то степени объяснить наблюдаемые явления. Выпадение закаленного образца, изготовленного из стали 15ХСНД, видимо, связано с формированием такого состояния структуры, в котором не наблюдается появления эффекта нарушения когерентности решеток мартенсита и цементита [23, 38–41]. Находясь в таком состоянии, обе фазы имеют низкую плотность дефектов строения кристаллической решетки [39, 42–45], что влияет на величину внутренних напряжений и делает ее достаточно низкой по сравнению с внутренними напряжениями, наблюдаемыми при подобной термической обработке для сталей 09Г2С и Ст3.

Выпадение значений анализируемых параметров для образца, изготовленного из стали 09Г2С, отпущенного при температуре 350 °С,

может быть объяснено процессами разупрочнения стали, возникающими из-за снижения плотности дислокаций и различных дефектов строения, скапливающихся на карбидных включениях, в качестве которых выступает соединение марганца с углеродом [23, 43–47], и приводящих к уменьшению внутренних напряжений. Кроме того, уменьшает величину внутренних напряжений и протекающий при среднем отпуске процесс распада мартенсита на феррит и цементит и диффузии углерода из обогащенных углеродом областей мартенсита [42, 45]. Образующиеся при таком процессе фазы феррита и обедненного мартенсита обладают более низкой твердостью по сравнению с первоначальной фазой мартенсита, что и обуславливает происходящее уменьшение величины внутренних напряжений и, как следствие, происходит разупрочнение [38, 47].

Для образца, изготовленного из стали Ст3, отпущенного при 650 °С, отклонение от обнаруженных зависимостей может быть связано с протекающим процессом коагуляции частиц цементита и увеличения среднего размера зерна. Протекание этих процессов приводит к тому, что структура приближается к равновесному состоянию [23, 38–42]. Увеличение среднего размера зерна и уменьшение количества зерен, наблюдаемых на микрошлифе, приводит к увеличению протяженности большеугловых границ, что обуславливает уменьшение величины внутренних напряжений, следовательно, искажений кристаллической решетки, которые они вызывают. Процесс укрупнения зерна останавливается при достижении «критического размера». Разупрочнение стали и образование более мягких фаз значительным образом сказываются на величинах коэрцитивной силы и предела прочности. Протекающие при этой термообработке процессы также приводят к снижению величины фактора разнотерности.

Выводы

1. Установлено, что для предела прочности, внутренних напряжений, коэрцитивной силы и фактора разнотерности для сталей 09Г2С, 15ХСНД и Ст3 наблюдаются общие удовлетворительные корреляционные зависимости. Проведенный математический анализ полученных

зависимостей, результаты которого говорят о наличии взаимосвязи между анализируемыми параметрами, показал, что при проведении определения величины фактора разнородности по различным критериям (площади или диаметра зерна) он не оказывает существенного влияния на наличие взаимосвязи между данной величиной и пределом прочности, величиной внутренних напряжений и коэрцитивной силой.

2. Полученные результаты, представленные в работе, показывают, что наблюдаемые выпадения некоторых точек, соответствующие характерным термическим воздействиям, приводящим к определенным структурно-фазовым изменениям, влияющим на однородность структуры стали, искажения в кристаллической решетке, вызваны наличием большеугловых границ и другими факторами. Отличие в процессах, протекающих в рассматриваемых сталях, связаны с процентным содержанием в них легирующих элементов.

3. Проведенный анализ можно рассматривать как концепцию развития структурного определения внутренних механизмов многофазной системы, в качестве которой рассматривается сталь, влияющих на механические и магнитные свойства сталей. Использование приведенных данных о влиянии дисперсности структуры на параметры стали позволит предсказать опасные состояния конструкций, возникающих при механических нагрузках, а также разработать наиболее эффективные методы диагностирования.

Список литературы

1. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 38–50. – DOI: 10/15593/2224-9877/2016.2.03.
2. Experimental determination and prediction of the mechanical properties of steel 1.7225 / J. Brnic, G. Turkalj, M. Canadija, J. Niu // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 600. – P. 47–52. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.097.
3. Zambrano O.A., Coronado J.J., Rodríguez S.A. Mechanical properties and phases determination of low carbon steel oxide scales formed at 1200° C in air // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 282. – P. 155–162. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.028.
4. Surface morphology characteristics and mechanical properties of corroded cold-formed steel channel sections / B. Nie, S. Xu, Z. Zhang, A. Li // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 42. – P. 102786. – DOI: 10.1016/j.job.2021.102786.
5. Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis / M. Chen, Sh. Xing, H. Liu, Ch. Jiang, K. Zhan, V. Ji // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, iss. 4. – P. 7644–7654. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.028.
6. Determination of the mechanical properties of surface-modified layer of 18CrNiMo7-6 steel alloys after carburizing heat treatment / M.H. Zhao, X.C. Han, G. Wang, G.T. Xu // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 148. – P. 84–93. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.08.021.
7. Сандомирский С.Г. Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40X // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 43–50.
8. Исследование деформации и оценка напряжений в материалах с упрочненным поверхностным слоем магнитными методами / Э.С. Горкунов, С.Ю. Митропольская, А.Л. Осинцева, Д.И. Вичужанин // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 95–104.
9. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / И.М. Полетика, Н.М. Егорова, О.А. Куликова, Л.Б. Зуев // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, № 3. – С. 37–40.
10. Relationship between microstructure and yield strength for plain carbon steel with ultrafine or fine (ferrite+cementite) structure / Ch. Zheng, L. Li, W. Yang, Z. Sun // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 617. – P. 31–38. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.08.050.
11. Zheng Ch., Li L. Effect of microstructure on mechanical behavior for eutectoid steel with ultrafine- or fine-grained ferrite+cementite structure // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 688. – P. 83–91. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.082.
12. Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure / R. Ueji, N. Tsuchida, D. Terada, N. Tsuji, Y. Tanaka, A. Takemura, K. Kunishige // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 59, iss. 9. – P. 963–966. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.06.050.
13. Substructure hardening in duplex low density steel / H.R. Abedi, A. Zarei Hanzaki, K.-L. Ou, C.-Y. Yu // Materials and Design. – 2017. – Vol. 116. – P. 472–480. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.020.



14. Elastoplastic transition in a metastable β -Titanium alloy, Timetal-18 – An in-situ synchrotron X-ray diffraction study / J.J. Bhattacharyya, S. Nair, D.C. Pagan, V. Tari, R.A. Lebensohn, A.D. Rollett, S.R. Agnew // *International Journal of Plasticity*. – 2021. – Vol. 139. – P. 102947. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102947.
15. *Motaman S.A.H., Haase Ch.* The microstructural effects on the mechanical response of polycrystals: a comparative experimental-numerical study on conventionally and additively manufactured metallic materials // *International Journal of Plasticity*. – 2021. – Vol. 140. – P. 102941. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102941.
16. *Motaman S.A.H., Roters F., Haase Ch.* Anisotropic polycrystal plasticity due to microstructural heterogeneity: a multi-scale experimental and numerical study on additively manufactured metallic materials // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol. 185. – P. 340–369. – DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.003.
17. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Введ. 1967–01–01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 62 с.
18. *Гроховский В.И.* Возможности цифровой микроскопии в металлографии // *Цифровая микроскопия: Материалы школы семинара*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 18–20.
19. *Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И.* Влияние разнородности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 37–44.
20. Определение взаимосвязи фактора разнородности и скорости коррозии конструкционной стали / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 106–125. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125.
21. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Введ. 1983–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 45 с.
22. Влияние структурно-фазового состояния нанокompозитов железо – цементит на процессы локальной активации / А.В. Сюгаев, С.Ф. Ломаева, С.М. Решетников, А.С. Шуравин, Е.Ф. Шарафеева, Д.В. Сурнин // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 395–399.
23. *Счастливцев В.М., Мурзаев Д.А., Яковлева И.Л.* Структура термически обработанной стали. – М.: Metallurgy, 1994. – 288 с.
24. *Callister W.D.* Materials science and engineering: an introduction. – 6th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2020. – 848 p. – ISBN 978-0471135760.
25. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method / R.A. Sokolov, V.F. Novikov, K.R. Muratov, A.N. Venediktov // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 19, pt. 5. – P. 2584–2585. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.
26. *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1978. – 568 с.
27. *Чулкина А.А., Ульянов А.И.* Влияние магнитных свойств цементита на коэрцитивную силу высокоуглеродистых сталей после закалки и отпуска // *Физика металлов и металловедение*. – 2009. – Т. 108, № 6. – С. 581–588.
28. *Щербинин В.Е., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 266 с.
29. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий (обзор) // *Дефектоскопия*. – 1985. – № 3. – С. 3–21.
30. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
31. *Буда Г.В., Ничипурук А.П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
32. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. – М.: Metallurgy, 1978. – 392 с.
33. *Ryan T.P.* Modern regression methods. – 2nd ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2008. – 672 p.
34. *Sprent P., Smeeton N.C.* Applied nonparametric statistical methods. – 3rd ed. – London, UK: Chapman & Hall/CRC, 2001. – 470 p.
35. *Scheffe H.* The analysis of variance. – New York: Wiley, 1959. – 267 p.
36. *Faraway J.J.* Practical regression and anova using R. – URL: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf> (accessed: 24.09.2021).
37. The R Manuals / ed. by the R Development Core Team. – URL: <https://cran.r-project.org/manuals.html> (accessed: 24.09.2021).
38. Влияние зернограницных сегрегаций на температуры мартенситного превращения в бикристаллах NiTi / Р.И. Бабичева, А.С. Семенов, С.В. Дмитриев, К. Жоу // *Письма о материалах*. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 162–167. – На англ. яз.
39. *Wollenberger H.J.* Point defects // *Physical metallurgy* / ed. by R.W. Cahn, P. Haasen. – Amsterdam: Elsevier, 1996. – Vol. 2. – P. 1621–1721. – ISBN 978-0-444-89875-3. – DOI: 10.1016/B978-044489875-3/50023-5.
40. *Rohrer G.S.* Structure and bonding in crystalline materials. – Cambridge: Cambridge University Press,

2004. – 552 p. – ISBN 9780511816116. – DOI: 10.1017/SBO9780511816116.

41. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208 с.

42. Фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистых мартенситных сталях / Л.М. Клейнер, Д.М. Ларинин, Л.В. Спивак, А.А. Шацов // Физика металлов и материаловедение. – 2009. – Т. 108, № 2. – С. 161–168.

43. Gao F., Heinisch H., Kurtz R.J. Diffusion of He interstitials in grain boundaries in α -Fe // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – Vol. 351. – P. 133–140. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.015.

44. Hart E.W. On the role of dislocations in bulk diffusion // Acta Metallurgica. – 1957. – Vol. 5, iss. 10. – P. 597. – DOI: 10.1016/0001-6160(57)90127-X.

45. Courtney T.H. Mechanical behavior of materials. – Singapore: McGraw Hill, 2000. – 752 p. – ISBN 978-1577664253.

46. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling / M. Li, M.A. Kirk, P.M. Baldo, D. Xu, B.D. Wirth // Philosophical Magazine. – 2012. – Vol. 92. – P. 2048–2078. – DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.

47. Noyan I.C., Cohen J.B. Residual stress – measurement by diffraction and interpretation. – New York: Springer, 1987. – 285 p. – ISBN 978-1-4613-9570-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Assessment of the effect of the steels structure dispersion on its magnetic and mechanical properties

Roman Sokolov^{a,*}, Vitaly Novikov^b, Kamil Muratov^c, Anatolii Venediktov^d

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>,  falcon.rs@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1987-351X>,  vitaly.nowikov2017@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>,  muratows@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>,  annatoliy@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07 June 2021

Revised: 06 August 2021

Accepted: 23 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

SEM

Tempering temperature

Grain size variation factor

Coercive force

Internal stresses

Grain size

Tensile strength

ABSTRACT

Introduction: The control of the mechanical properties of structural steels is one of the main processes that regulate the service life of equipment. In most technical processes (pressure treatment, welding, rolling, thermal exposure), structure changes both in local areas and in the entire volume. Changes in the steel structure entail changes in its properties and as a result in local areas, at various stages of operation, the likelihood of the occurrence and development of critical defects increases. Its presence significantly affects the performance of the equipment, and leads to premature aging of the material and its failure. Precisely because the control of the mechanical properties of steel remains one of the urgent problems, new control methods are being developed. It is known that all properties of steel depend on the structure of the substance, however, studies on the effect of the dispersion of the structure under consideration on the mechanical properties are presented in an insignificant amount. **Purpose:** to analyze from a mathematical point of view the influence of the factor of different grain size, as a parameter reflecting the dispersity of the system, on the mechanical properties of structural steel. **The paper studies** a heat-treated planar samples of steels *15KhSND*, *09G2S* and *St3*. **Methods of research:** scanning electron and optical microscopes are used to study the grain structure and grain boundaries; *SIAMS 700* software package is used for finding the boundaries and average data of the grain structure; portable X-ray fluorescence analyzer of metals and alloys *X-MET 7000* is used to determine the chemical composition of the test samples in percentage; tensile testing machine *IR-50* is used for measuring the tensile strength of samples; Vickers hardness tester is used to determine the hardness of samples. **Results and discussion:** it is found that there is a satisfactory correlation for the mechanical properties of structural steels (hardness and ultimate strength) and the grain size factor, which can be used to predict the hazardous states of structures and the operating time. The analysis of variance and regression of the detected dependencies is carried out. It is noted that the dropout of some values from the general regression dependence can most likely be associated with a decrease in the value of internal stresses as a result of a decrease in the distortions of the crystal lattice of steel occurring during heat treatment. It should be noted that the processes occurring and the degree of its influence on the properties of the structural steels under consideration can be different due to the presence of different amounts of alloying elements in the composition of the studied steels.

For citation: Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Assessment of the effect of the steels structure dispersion on its magnetic and mechanical properties. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 93–110. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110. (In Russian).

References

1. Novikov V.F., Neradovskii D.F., Sokolov R.A. Ispol'zovanie kvazistaticheskikh petel' magnitnogo gisterezisa dlya kontrolya struktury stali [The using of quasi-static magnetic hysteresis loops to control steel structures]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 38–49. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.03.

* Corresponding author

Sokolov Roman A., Post-graduate Student, Assistant
 Industrial University of Tyumen,
 38 Volodarskogo str.,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: 8 (919) 925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

2. Brnic J., Turkalj G., Canadija M., Niu J. Experimental determination and prediction of the mechanical properties of steel 1.7225. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 600, pp. 47–52. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.097.
3. Zambrano O.A., Coronado J.J., Rodríguez S.A. Mechanical properties and phases determination of low carbon steel oxide scales formed at 1200° C in air. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 282, pp. 155–162. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.028.
4. Nie B., Xu S., Zhang Z., Li A. Surface morphology characteristics and mechanical properties of corroded cold-formed steel channel sections. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 42, p. 102786. DOI: 10.1016/j.job.2021.102786.
5. Chen M., Xing Sh., Liu H., Jiang Ch., Zhan K., Ji V. Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, iss. 4, pp. 7644–7654. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.028.
6. Zhao M.H., Han X.C., Wang G., Xu G.T. Determination of the mechanical properties of surface-modified layer of 18CrNiMo7-6 steel alloys after carburizing heat treatment. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 148, pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.08.021.
7. Sandomirskii S.G. Korrelyatsionnye zavisimosti mezhdru mekhanicheskimi svoistvami i magnitnym parametrom stali 40Kh [Correlation dependences between mechanical properties and magnetic parameter of the 41CR4 steel]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2019, no. 3 (48), pp. 43–50.
8. Gorkunov E.S., Mitropolskaya S.Yu., Osintseva A.L., Vichuzhanin D.I. Issledovanie deformatsii i otsenka napryazhenii v materialakh s uprochnennym poverkhnostnym sloem magnitnymi metodami [Magnetic methods for deformation investigation and stress estimation in surface-hardened materials]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2009, vol. 12, no. 2, pp. 95–104. (In Russian).
9. Poletika I.M., Egorova N.M., Kulikova O.A., Zuev L.B. Ob ul'trazvukovom kontrole neodnorodnosti mekhanicheskikh svoistv goryachekatanoi stali [Supersonic testing of mechanical property uniformity in hot-rolled steel]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Journal*, 2001, vol. 71, no. 3, pp. 37–40. (In Russian).
10. Zheng Ch., Li L., Yang W., Sun Z. Relationship between microstructure and yield strength for plain carbon steel with ultrafine or fine (ferrite+cementite) structure. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 617, pp. 31–38. DOI: 10.1016/j.msea.2014.08.050.
11. Zheng Ch., Li L. Effect of microstructure on mechanical behavior for eutectoid steel with ultrafine- or fine-grained ferrite+cementite structure. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 688, pp. 83–91. DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.082.
12. Ueji R., Tsuchida N., Terada D., Tsuji N., Tanaka Y., Takemura A., Kunishige K. Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 59, iss. 9, pp. 963–966. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.06.050.
13. Abedi H.R., Zarei Hanzaki A., Ou K.-L., Yu C.-H. Substructure hardening in duplex low density steel. *Materials and Design*, 2017, vol. 116, pp. 472–480. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.020.
14. Bhattacharyya J.J., Nair S., Pagan D.C., Tari V., Lebensohn R.A., Rollett A.D., Agnew S.R. Elastoplastic transition in a metastable β -Titanium alloy, Timetal-18 – An in-situ synchrotron X-ray diffraction study. *International Journal of Plasticity*, 2021, vol. 139, p. 102947. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102947.
15. Motaman S.A.H., Haase Ch. The microstructural effects on the mechanical response of polycrystals: a comparative experimental-numerical study on conventionally and additively manufactured metallic materials. *International Journal of Plasticity*, 2021, vol. 140, p. 102941. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102941.
16. Motaman S.A.H., Roters F., Haase Ch. Anisotropic polycrystal plasticity due to microstructural heterogeneity: a multi-scale experimental and numerical study on additively manufactured metallic materials. *Acta Materialia*, 2020, vol. 185, pp. 340–369. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.12.003.
17. GOST 6996–66. *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoistv* [State Standard 6996–66. Welded joints. Methods of mechanical properties determination]. Moscow, Standards Publ., 2005. 62 p.
18. Grokhovskiy V.I. [Possibilities of digital microscopy in metallography]. *Tsifrovaya mikroskopiya: materialy shkoly seminara* [Digital microscopy. School-seminar materials]. Ekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2001, pt. 1, pp. 18–20. (In Russian).
19. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Vliyanie raznozernistosti struktury na korrozionnyuyu stoikost' naruzhnoi poverkhnosti trub iz uglerodistoi stali 20, primenyaemykh v teploenergetike [Influence of the uneven grain structure on the corrosion resistance of the outer surface of pipes made of carbon steel 20 used in heat power engineering]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 37–44.

20. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Opredelenie vzaimosvyazi faktora raznozernistosti i skorosti korrozii konstruktsionnoi stali [Determination of the relationship between the factor of grain size factor and the corrosion rate of structural steel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 106–125. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125.
21. GOST 5639–82. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [State Standard 5639–82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size]. Moscow, Standards Publ., 2003. 45 p.
22. Syugaev A.V., Lomaeva S.F., Reshetnikov S.M., Shuravin A.S., Sharafeeva E.V., Surnin D.V. The effect of the structure-phase state of iron-cementite nanocomposites on local activation processe. *Protection of Metals*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 367–371. DOI: 10.1134/S0033173208040097. Translated from *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 395–399.
23. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L. *Struktura termicheski obrabotannoi stali* [Structure of heat treated steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 288 p.
24. Callister W.D. *Materials science and engineering: an introduction*. 6th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2020. 848 p. ISBN 978-0471135760.
25. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pt. 5, pp. 2584–2585. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.
26. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 568 p.
27. Chulkina A.A., Ul'yanov A.I. Vliyanie magnitnykh svoystv tsementita na koertsitivnyuyu silu vysokouglerodistykh stalei posle zakalki i otpuska [Influence of the magnetic properties of cementite on the coercive force of high-carbon steels after quenching and tempering]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, no. 6, pp. 581–588. (In Russian).
28. Shcherbinin V.E., Gorkunov E.S. *Magnitnye metody strukturnogo analiza i nerazrushayushchego kontrolya* [Magnetic methods of structural analysis and non-destructive testing]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 1996. 266 p.
29. Mikheev M.N., Gorkunov E.S. Magnitnye metody nerazrushayushchego kontrolya strukturnogo sostoyaniya i prochnostnykh kharakteristik termicheski obrabotannykh izdelii (obzor) [Magnetic methods for non-destructive testing of the structural state and strength characteristics of heat-treated products]. *Defektoskopiya = Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1985, no. 3, pp. 3–21. (In Russian).
30. Mikheev M.N., Gorkunov E.S. *Magnitnye metody strukturnogo analiza i nerazrushayushchego kontrolya* [Magnetic methods of structural analysis and non-destructive testing]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 252 p.
31. Bida G.V., Nichipuruk A.P. *Magnitnye svoystva termoobrabotannykh stalei* [Magnetic properties of heat-treated steels]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 2005. 218 p.
32. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoi obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 392 p.
33. Ryan T.P. *Modern regression methods*. 2nd ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2008. 672 p.
34. Sprent P., Smeeton N.C. *Applied nonparametric statistical methods*. 3rd ed. London, UK, Chapman & Hall/CRC, 2001. 470 p.
35. Scheffé H. *The analysis of variance*. New York, Wiley, 1959. 267 p.
36. Faraway J.J. *Practical regression and anovausing R*. Available at: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf> (accessed 24.09.2021).
37. The R Development Core Team, ed. *The R manuals*. Available at: <https://cran.r-project.org/manuals.html> (accessed 24.09.2021).
38. Babicheva R.I., Semenov A.S., Dmitriev S.V., Zhou K. Effect of grain boundary segregations on martensitic transformation temperatures in NiTi bi-crystals. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2019, vol. 9 (2), pp. 162–167. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.
39. Wollenberger H.J. Point defects. *Physical metallurgy*. Ed. by R.W. Cahn, P. Haasen. Amsterdam, Elsevier, 1996, vol. 2, pp. 1621–1721. ISBN 978-0-444-89875-3. DOI: 10.1016/B978-044489875-3/50023-5.
40. Rohrer G.S. *Structure and bonding in crystalline materials*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004. 552 p. ISBN 9780511816116. DOI: 10.1017/CBO9780511816116.
41. Novikov I.I. *Defekty kristallicheskogo stroeniya metallov* [Defects in the crystal structure of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 208 p.

42. Kleiner L.M., Larinin D.M., Shatsov A.A., Spivak L.V. Fazovye i strukturnye prevrashcheniya v nizkouglerodistykh martensitnykh stalyakh [Phase and structural transformations in low-carbon martensitic steels]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, no. 2, pp. 161–168. (In Russian).
43. Gao F., Heinisch H., Kurtz R.J. Diffusion of He interstitials in grain boundaries in α -Fe. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, vol. 351, pp. 133–140. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.015.
44. Hart E.W. On the role of dislocations in bulk diffusion. *Acta Metallurgica*, 1957, vol. 5, iss. 10, p. 597. DOI: 10.1016/0001-6160(57)90127-X.
45. Courtney T.H. *Mechanical behavior of materials*. Singapore, McGraw Hill, 2000. 752 p. ISBN 978-1577664253.
46. Li M., Kirk M.A., Baldo P.M., Xu D., Wirth B.D. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling. *Philosophical Magazine*, 2012, vol. 92, pp. 2048–2078. DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.
47. Noyan I.C., Cohen J.B. *Residual stress – measurement by diffraction and interpretation*. New York, Springer, 1987. 285 p. ISBN 978-1-4613-9570-6.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Структурные и механические свойства нержавеющей стали, сформированной в условиях послойного сплавления проволоки электронным лучом

Василий Фёдоров^{1, a, *}, Александр Рыгин^{2, b}, Василий Клименов^{1, c}, Никита Мартюшев^{1, d},
 Анатолий Клопотов^{2, 3, e}, Ирина Стрелкова^{1, f}, Сергей Матрёнин^{1, g}, Андрей Батранин^{1, h},
 Валентина Дерюшева^{1, i}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634003, Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, Томск, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5164-5875>,  fedorov@tpu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-5664-8234>,  alexandr.rygin@gmail.com,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-7583-0170>,  klimenov@tpu.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0002-3690-0436>,  klopotovaa@tsuab.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-2222-2865>,  strelkova@tpu.ru,

^g  <https://orcid.org/0000-0002-2188-8120>,  mshv@tpu.ru, ^h  <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>,  batranin@tpu.ru,

ⁱ  <https://orcid.org/0000-0002-2116-3891>,  vderusheva@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 62-4

История статьи:

Поступила: 02 сентября 2021

Рецензирование: 16 сентября 2021

Принята к печати: 23 сентября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

Электронно-лучевая наплавка

Нержавеющая сталь

Крупнозернистая аустенитная сталь

Финансирование:

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ.

Благодарности:

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из перспективных современных способов формирования деталей машин являются аддитивные технологии. Изготовление этим методом дает возможность получать сложную форму деталей и качественную структуру. При этом качество формируемой структуры зависит от большого количества параметров – оборудования, режимов его работы, материала, среды и т.п. Крупные зарубежные компании, производящие 3D-принтеры, при поставке оборудования дают технологические рекомендации по работе на нем. Эти рекомендации включают информацию о производителях сырья (порошка для печати) и их выпускаемых продуктах, с которыми может работать их оборудование, а также о том, какие режимы необходимо использовать для работы с этими порошками. Для разрабатываемых в рамках исследовательских программ и программ импортозамещения отечественных установок эти параметры необходимо подбирать. Очень часто перед исследователями и разработчиками оборудования для трехмерной печати стоит задача получения на имеющемся сырье образцов деталей с минимальной пористостью, однородностью структуры и механическими свойствами хотя бы на уровне литых заготовок. Одним из распространенных материалов для трехмерной печати является нержавеющая сталь. Данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью, что снижает требования к среде, в которой ведется 3D-печать. Изготовленные изделия из нержавеющей стали обладают хорошим сочетанием прочностных и пластических характеристик. **Целью работы** является получение образцов с минимальным количеством макро- и микродефектов и однородной структурой из нержавеющей стали методом наплавки проволокой на электронно-лучевой оригинальной установке, разработанной в Томском политехническом университете. **Методы исследования** образцов из нержавеющей стали марки AISI 308LSi, полученных трехмерной печатью: рентгеноструктурный анализ, томография, химический анализ, металлографический анализ, исследование микротвердости. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что напечатанные на разработанной установке электронно-лучевой трехмерной печати образцы из нержавеющей стали марки AISI 308LSi не содержат макродефектов во всем объеме образца. Присутствующие небольшие микродефекты остаточных газовых пор имеют размер не более 5,2 мкм. Микроструктура образцов формируется близкой к микроструктуре крупнозернистых литых аустенитных сталей и состоит из столбчатых зерен аустенитной матрицы γ -Fe и высокотемпературного феррита. Границы раздела между слоями укладки проволоки не выражены, но есть небольшие отличия по фазовому составу. На основе анализа полученных результатов установлено, что использование электронно-лучевой трехмерной печати для изготовления деталей из стали марки AISI 308LSi дает структуру, аналогичную литым аустенитным сталям. Появления макродефектов не происходит, а количество газовых пор мало.

Для цитирования: Структурные и механические свойства нержавеющей стали, сформированной в условиях послойного сплавления проволоки электронным лучом / В.В. Фёдоров, А.В. Рыгин, В.А. Клименов, Н.В. Мартюшев, А.А. Клопотов, И.Л. Стрелкова, С.В. Матрёнин, А.В. Батранин, В.Н. Дерюшева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 111–124. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-111-124.

*Адрес для переписки

Федоров Василий Викторович, заведующий лабораторией
 Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет,
 пр. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (3822) 606006, e-mail: fedorov@tpu.ru

Ведение

Аддитивные технологии (АТ), или 3D-печать металлами, являются наиболее быстрорастущим сектором аддитивного производства (АП). АТ дают возможность производить детали, которые не могут быть выполнены другими методами, обеспечивают более низкую материалоемкость в сравнении с другими методами и снижают трудозатраты на изготовление деталей [1–4]. Важным в 3D-печати металлами является то, что твердотельная цифровая модель детали сочетается с программным обеспечением собственно печатающего устройства. Изготовление деталей осуществляется послойным наплавлением с использованием как различных источников тепла, так и разных исходных материалов. Потребность в таких изделиях существует в аэрокосмической промышленности, здравоохранении, энергетике и на транспорте. Примерами таких изделий могут служить индивидуальные имплантаты в медицине, лопатки турбин, специальные охладители с внутренними каналами, крепёжные элементы, сетчатые структуры и фермы с оптимальным соотношением веса и прочности для космической техники и т. п. Очень важно, что с помощью АП возможно изготовление деталей со специфическим составом и свойствами. Методы послойного сплавления металлического порошка на подложке при непосредственном оплавлении материала в зоне высокоэнергетического пучка получили наибольшее распространение в аддитивных технологиях изготовления металлических изделий. При этом в качестве высокоэнергетических источников чаще всего применяются лазеры и электронно-лучевые пушки [1–6], в отдельных случаях дуговые разряды и газоразрядная плазма [7, 8]. Следует отметить, что в последнее время наряду с селективными методами сплавления материалов в аддитивных технологиях всё чаще используют методы послойного сплавления при прямом осаждении материала в зоне высокоэнергетического лазерного или электронного луча. Нередко используется подача наплаваемого материала в виде проволоки или стержня [7–13]. В качестве высокоэнергетических источников тепла используются в таком случае электронно-лучевые или дуговые источники [7, 10–13]. Эти источники позволяют осуществлять процесс 3D-печати с высокой производительно-

стью и дают низкую пористость напечатанных изделий. В АТ в качестве исходных материалов для печати применяются различные металлы, сплавы и соединения [4, 14]. Однако наиболее часто используют нержавеющие стали и титановые сплавы. Потенциал применения изделий из них очень велик. Работа с титановыми сплавами сопряжена с рядом трудностей – их сплавление необходимо производить в вакууме. Сплавление в вакууме более эффективно при использовании электронного луча [1, 5, 10–13]. Нержавеющие стали аустенитного класса хорошо поддаются сплавлению как методом селективного лазерного спекания, так и методом электронно-лучевого сплавления [1, 4, 12, 14–17].

Структура изделий из нержавеющих сталей и титановых сплавов напрямую зависит от способа их получения. Параметры работы оборудования при печати напрямую оказывают влияние на прочность, твердость, жаропрочность, жаростойкость и другие свойства [18]. При печати стальных деталей методом послойного сплавления формируется направленная кристаллическая структура. В сравнении с традиционными методами изготовления деталей (литье, обработка металлов давлением) могут появляться новые фазы, изменяться химический состав, структура и дефекты на различных масштабных уровнях [4]. Изменения структуры стальных деталей, изготовленных методами АТ, дают им изменения в таких свойствах, как модуль упругости, прочность, вязкость, усталостная прочность, ползучесть. В конечном итоге эти изменения влияют на коррозионную стойкость сталей и изделий в целом [15–17]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных 3D-печати сталями, работ, показывающих результаты исследований стальных образцов на различных масштабных уровнях и с использованием методов неразрушающего контроля, не так много. Несплошности и поры являются типичными дефектами для деталей, изготавливаемых методом послойной 3D-печати. Для устранения такого рода дефектов применяют различные виды последующей обработки. Дополнительная постобработка увеличивает сложность технологического процесса и повышает стоимость готового изделия. В то же время исследование порообразования при различных режимах работы 3D-принтера показывает, что возможно без дополнительной последующей обработки снизить пористость за счет

подбора режимов [19]. В последнее время для исследования пористости в деталях, напечатанных с помощью АТ, применяют различные методы неразрушающего контроля [13, 20]. Для неразрушающего контроля свойств напечатанных изделий из титановых сплавов нередко используют наноиндентирование. Этот метод применяется для изучения свойств титановых сплавов, формируемых в условиях плазменного воздействия [21], электронно-лучевого сплавления порошков [22] и электронно-лучевого аддитивного процесса [23]. С помощью наноиндентирования также исследуют материалы, полученные точечной контактной сваркой сплавов титана и золота [24].

Таким образом, разработка новых методов и методик производства материалов из нержавеющей сталей является одним из ключевых направлений развития современного производства. Высокое значение имеет самостоятельная разработка установок и комплексов производства изделий аддитивными методами на их основе [12].

Целью работы является получение образцов из нержавеющей стали с однородной структурой и минимальным количеством макро- и микродефектов методом наплавки проволокой на электронно-лучевой установке, разработанной в Томском политехническом университете.

Материалы и методики

Печать образцов выполнялась на электронно-лучевой установке, разработанной Томским политехническим университетом [15], проволокой из нержавеющей стали. Печать осуществлялась при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча

от 15 до 20 мА (в зависимости от удаленности от подложки). Таким образом, подводимая мощность изменялась от 450 до 600 Вт. При изготовлении образца первых три слоя были сделаны на ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 20 мА. Высокое значение тока использовалось для разогрева подложки. Следующих 3 слоя формировались на ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 17 мА для снижения скорости разогрева формируемого образца. Остальные слои формировались на ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 15 мА, для того чтобы поступающее тепло успевало отводиться от заготовки. Сфокусированный луч (диаметр 150 мкм) перемещался по круговой развертке диаметром 4 мм. Частота движения луча по развертке 1000 Гц. В область развертки осуществлялась подача проволоки, а формирование геометрии образца достигалось за счет перемещения стола по трем осям. При этом расстояние между треками (hatching distance) составляло 4 мм, а высота слоя – порядка 0,8 мм, движение в горизонтальной плоскости зигзагообразное. Внешний вид образца и схема построения изображены на рис. 1.

Исходным материалом для получения заготовки методом электронно-лучевой наплавки являлась стальная проволока марки стали AISI 308LSi (аналог отечественной марки 04X19H9). Химический состав проволоки представлен в таблице.

Образцы для последующих исследований были вырезаны электроискровым методом из заготовки с целью формирования геометрически правильных образцов в виде параллелепипедов с габаритными размерами 5×5×10 мм.

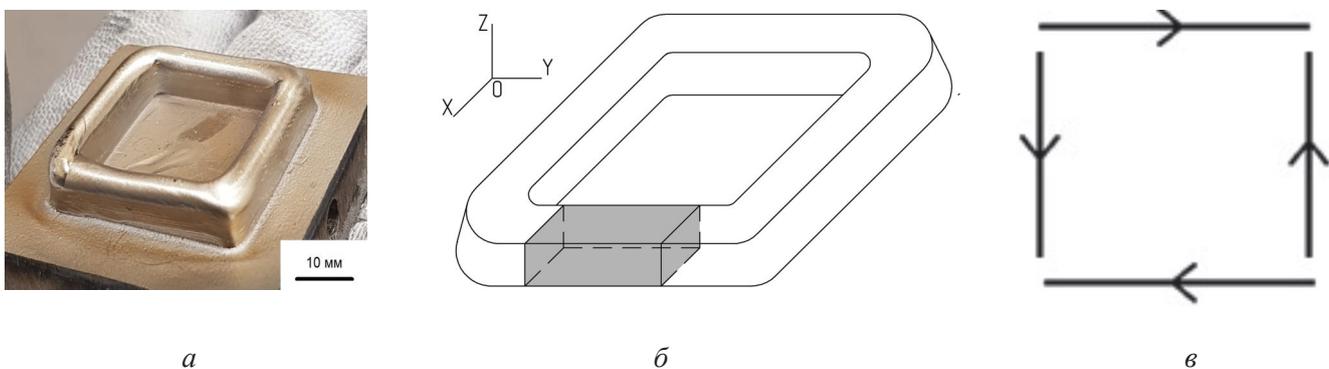


Рис. 1. Внешний вид полученной заготовки (а) и область вырезания образца (б), схема построения заготовки (в)

Fig. 1. Appearance of the obtained blank (a) and sample cutting area (b), blank construction scheme (c)

Химический состав исходного материала
Chemical composition of the raw material

Fe, % (balance)	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	P, %	S, %
64,82...69,37	0,03	1,4...2,1	0,65...1,0	19,5...21,0	9,0...11,0	0,03	0,02

Томографические исследования за контролем микро- и макродефектности полученных образцов проведен на компьютерном рентгеновском микротомографе «Орел-МТ». Данный аппарат оборудован рентгеновской трубкой XWT 160-ТС и детекторной панелью PaxScan-2520V с системой контроля позиционирования. Сканирование образцов осуществлялось при следующих параметрах: ускоряющее напряжения – 130 кВ, сила тока – 27 мкА, разрешение – 11,3 мкм, количество проекций – 1200 ед., шаг съемки – 0,3, медный фильтр – 2 мм. Томографическая реконструкция осуществлялась с помощью программного продукта Nrecon software, разработанного Брюккермикро-КТ. После реконструкции томограммы сегментировались с целью получения двух моделей: самого материала образца и внутренней пористости. Кроме этого исследовались морфологические свойства отдельных пор: объем, характерный диаметр и степень сферичности. Сегментирование и анализ производились в программе STanalyser (Брюккермикро-КТ).

Микроструктурные исследования осуществляли с помощью металлографического микроскопа Axio Observer производства Carl Zeiss с увеличениями до 1000 крат. Микроскоп оснащен программным обеспечением для количественного анализа фазового и структурного состава сплавов. Металлографические шлифы в поперечном и продольном сечении готовились путем шлифования на шлифовальных шкурках с различной величиной зерна абразива. Финишную полировку проводили на сукне с применением водной суспензии окиси хрома. Контроль микроструктуры проводили после травления микрошлифа раствором концентрированных азотной HNO_3 и соляной HCl кислот, взятых в соотношении 1:3 по объему.

Рентгеноструктурные исследования образцов с целью определения параметров элементарных ячеек соединений и фазового состава проведены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S, расположенном в Научно-образовательном инновационном центре «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского

политехнического университета (Инженерная школа новых производственных технологий) при ускоряющем напряжении и силе тока, равных 40,0 кВ и 30,0 мА соответственно. Источником рентгеновского излучения $\text{Cu}_{K\alpha}$ (длина волны 1.5406 Å) выступил Cu-анод. Диапазон измерения составил от 10 до 80 градусов, скорость сканирования – 2,0 градус/мин с шагом – 0,02 градуса. Идентификация структурного состояния осуществлялась методом Ритвельда. В качестве эталонных решеток использовались кристаллографические данные базы COD.

Распределение твердости по высоте образцов получены с использованием автоматического комплекса на базе микротвердомера «Duramin-5» при величине нагрузки индентирования 25 г (245,17 мН) и шагом 250 мкм от нижнего края образца и между отпечатками.

Проведение измерений твердости по высоте заготовки осуществлялось на установке NanoIndenter G200 (отделение материаловедения, ИШНПТ, НИ ТПУ). Индентирование на данной установке проводится пирамидой Берковича с постоянной заданной величиной нагрузки, схемой и шагом между точками индентирования. Величина наибольшего усилия при наноиндентировании составила 250 мН с шагом между участками 100 мкм при отступе от подложки 50 мкм с целью исключения краевых эффектов измерения твердости.

Проведены механические испытания по сжатию на испытательной установке Instron согласно ГОСТ 25.503–97. Нагружение осуществлялось вдоль наиболее протяженной стороны образцов со скоростью 5 мм/мин.

В процессе испытаний на сжатие образцов AISI 308LSi их разрушения не произошло, деформация проходила преимущественно по пластическому механизму.

Результаты и обсуждение

В данной работе на спроектированной и изготовленной на базе Томского политехнического университета электронно-лучевой установке

трехмерной печати [16] проволокой была изготовлена партия образцов. Для полученных образцов был проведен ряд исследований (металлографических, томография, рентгеноструктурных и т. д.).

Исследования образцов методом компьютерной томографии с учетом значения разрешающей способности, равной 11,3 мкм, показали отсутствие микро- и макродефектов на поверхности и в объеме полученного образца (рис. 2).

Полученный результат свидетельствует о том, что в результате применения электронно-лучевого метода аддитивной наплавки удалось избежать возникновения протяженных дефектов.

Микроструктура образцов имеет форму, характерную для крупнозернистых литых аустенитных сталей. Она состоит из столбчатых зерен, растущих вдоль укладки слоев проволоки по высоте (рис. 3а). Средний размер аустенитного зерна составляет $d = 150...200$ мкм (рис. 3б).

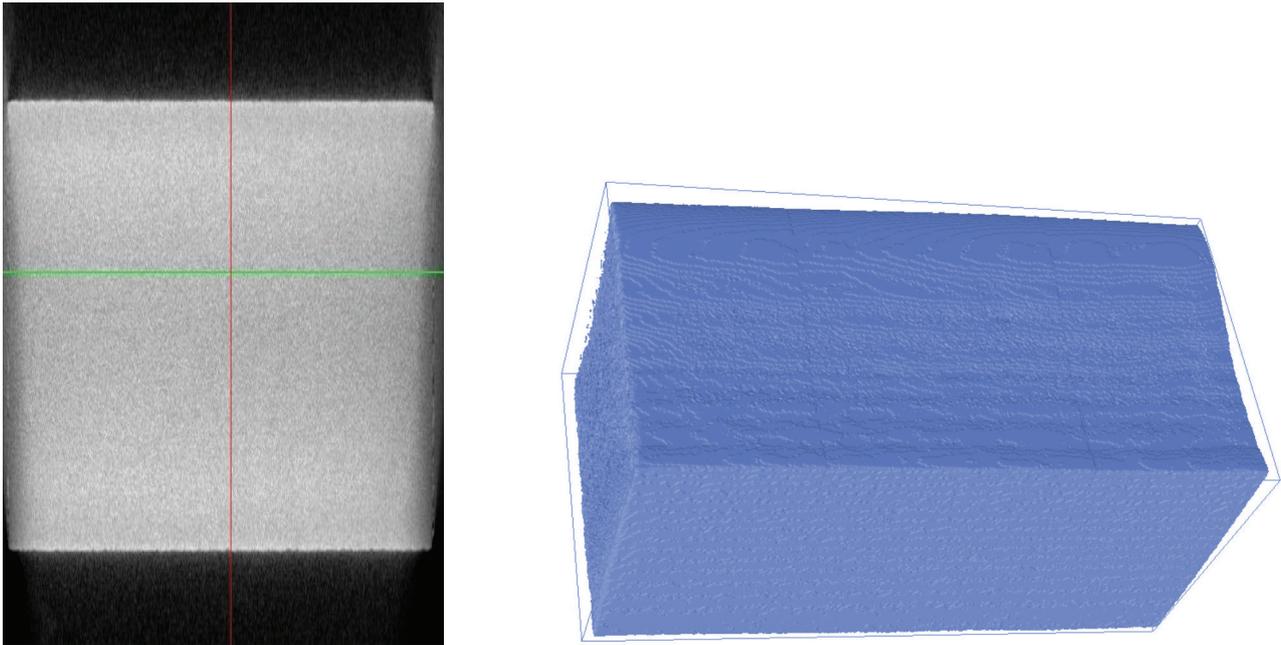


Рис. 2. Результаты томографических исследований полученных аддитивным методом образцов AISI 308LSi

Fig. 2. Tomography of AISI 308LSi specimens manufactured by WAAM

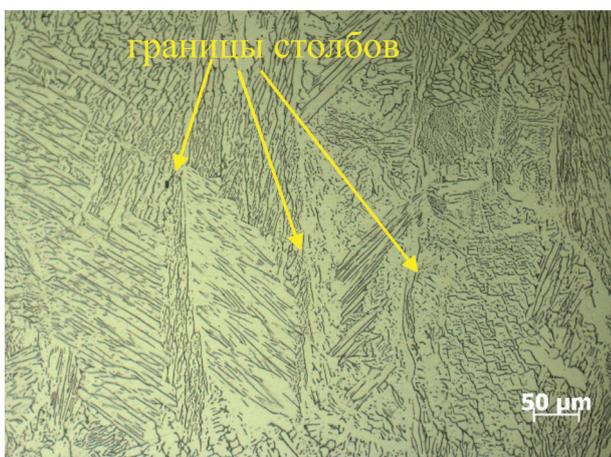


Рис. 3а. Вид столбчатых зерен в продольном сечении образца

Fig. 3a. Columnar grains in the longitudinal section of the specimen

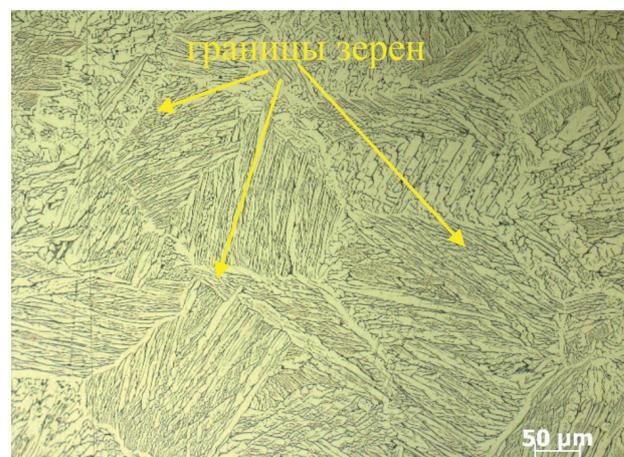


Рис. 3б. Зеренная структура в поперечном сечении образца

Fig. 3b. Grain structure in the cross-section of the specimen

В процессе последовательного послойного электронно-лучевого сплавления проволоки каждый последующий слой формируется путем сплавления металла с предыдущим слоем при нагревании части металла до температуры плавления. При таком режиме сплавления не было выявлено явных границ раздела между слоями. При этом было установлено, что разные части заготовки характеризуются неоднородностью фазового состава и разными механическими свойствами.

Внутри столбчатых зерен как в продольном, так и в поперечном направлении обнаружено формирование двухфазной структуры. Двухфазность характеризуется аустенитной матрицей на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой (светлый цвет) и включениями из высокотемпературного феррита на основе δ -Fe с ОЦК-решеткой разной формы (темный цвет). Анализ микроструктуры позволил выделить три характерных морфологических типа включений из феррита: игольчатый, вермикулярный и зернистый (рис. 5).

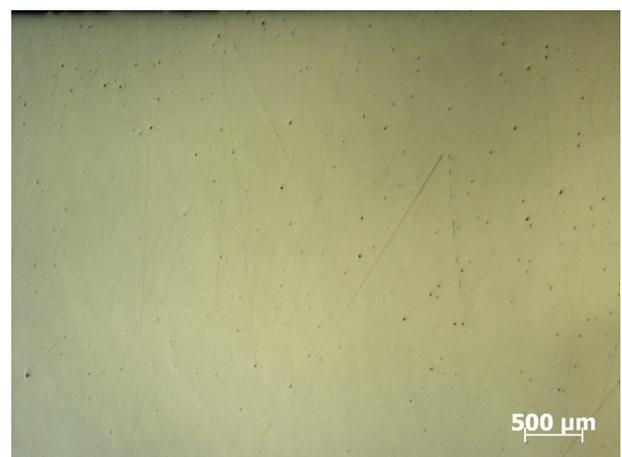
Макроструктура полученных образцов имеет ориентированную в направлении выращивания столбчатую крупнозернистую форму. Эпитаксиальный рост приводит к формированию зерен шириной от 70 до 230 мкм и протяженностью от 180 до 630 мкм. Микроструктура образовавшихся зерен создает аустенитную матрицу, включающую в себя игольчатую, зернистую и вермикулярную форму δ -феррита. Макроскопические неоднородности в виде границ между наплавля-

емыми слоями металла отсутствуют. Исследования на другом масштабном уровне поверхности образцов методами сканирующей электронной микроскопии позволили выявить дефекты в виде остаточных газовых пор, возникших в процессе выращивания заготовки. Размер газовых пор в структуре металла колеблется в диапазоне 0,5...5,2 мкм (рис. 4).

В разных зернах форма и размер включений из δ -Fe различна (рис. 5, а). Наблюдаются зерна аустенита с игольчатым по форме ферритом и незначительным количеством зернистого феррита (рис. 5, б). Выявлены также зерна аустенита с вермикулярным ферритом и большим количеством зернистого феррита (рис. 5, в). Невысокое содержание углерода в исследуемой аустенитной стали при данном методе получения образцов не привел к образованию карбидов металлов, но способствовал формированию зернистого феррита с размером менее $d = 1$ мкм. Согласно литературным данным [15, 16] при данном химическом составе аустенитной стали (см. таблицу) следует, что кристаллизация начинается с образования δ -Fe феррита из жидкого расплава по механизму перетектического превращения. Количество и форма включений феррита определяется разной скоростью охлаждения слоев наплавляемой проволоки. При высокой скорости охлаждения нового слоя проволоки практически отсутствует диффузия основных легирующих элементов (Ni, Cr), приводящих к фазовому превращению δ -Fe в аустенит, размер и количество



а



б

Рис. 4. Снимки поверхности поперечного шлифа полученных аддитивным методом образцов AISI 308LSi: продольное сечение (а), поперечное сечение (б)

Fig. 4. Surface of the sections of WAAM-obtained AISI 308LSi steel specimens: longitudinal section (а), cross section (б)

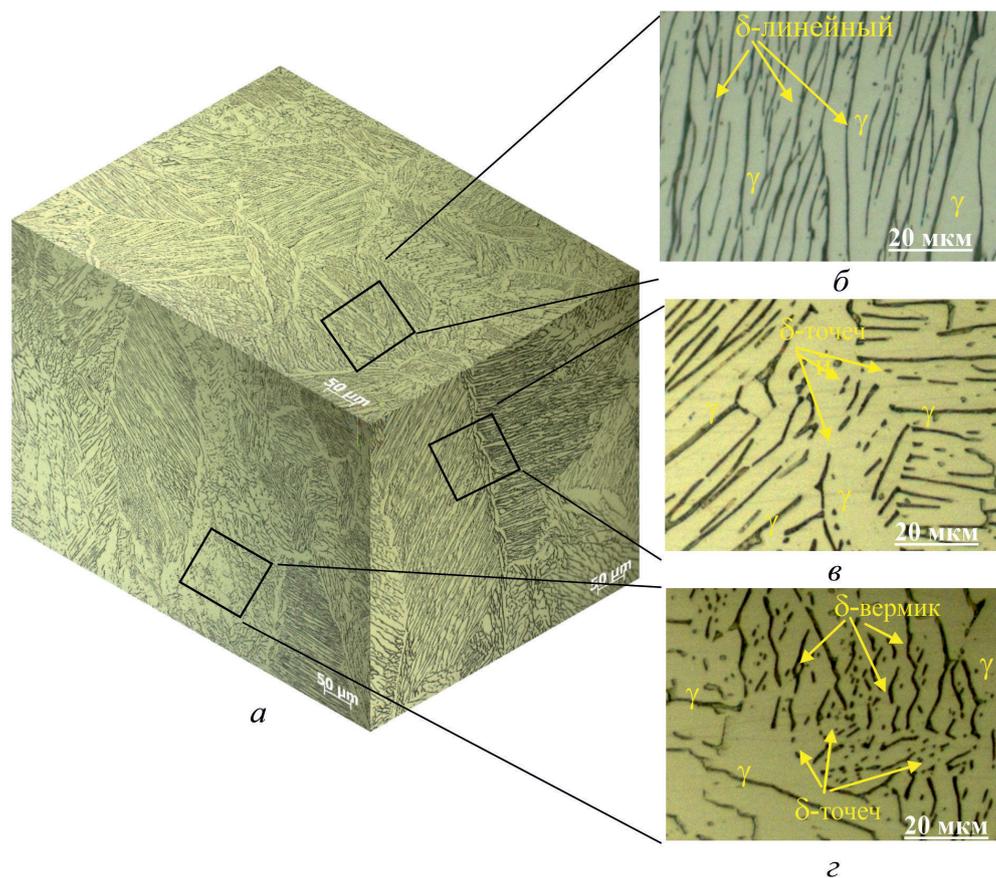


Рис. 5. Фотография микроструктуры трех поверхностей образца

Fig. 5. Microstructure of three surfaces of the sample

феррита увеличивается и большая его часть имеет вермикулярный или игольчатый вид. Уменьшение скорости охлаждения предыдущего слоя и высокая температура дают возможность возникновения процесса диффузии легирующих элементов (Ni, Cr). Процесс диффузии приводит к растворению δ -Fe. Поэтому границы сформировавшихся столбчатых зерен имеют вид аустенита с небольшим количеством зернистого δ -Fe (рис. 5, в).

Проведенный рентгеноструктурный анализ (рис. 6) показал следующий фазовый состав образцов: основная фаза представлена в виде аустенита (γ -железа, ГЦК) с величиной параметра элементарной ячейки $3,5807 \text{ \AA}$, вторую фазу образует стабилизированная при низких температурах фаза на основе δ -Fe с ОЦК-структурой с параметром элементарной ячейки, равным $2,8613 \text{ \AA}$. Массовые доли по результатам рентгено-флуоресцентного анализа составили для аустенитной и ферритной фаз 79 и $21 \pm 3 \%$ мас. соответственно.

Дифрактограммы от различных плоскостей образцов, полученных электронно-лучевым

сплавлением из нержавеющей проволоки изображены на рис. 7 и 8. В результате рентгеноструктурного анализа выявлено, что матричной фазой является твердый раствор на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой. Второй фазой является твердый раствор с ОЦК-решеткой на основе α -Fe. Полученные данные согласуются со строением тройной фазовой диаграммы системы Cr-Ni-Fe (рис. 9) [25].

На этой диаграмме звездочкой показано расположение трехкомпонентного сплава с химическим составом исследуемой стали. При кристаллизации сплава с таким составом при неравновесных процессах, как это имеет место при послойном образовании слитка методом электронно-лучевой наплавки, возможно образование двухфазной смеси из двух твердых растворов на основе ОЦК- и ГЦК-решеток: γ -(Fe,Ni,Cr) и α -(Cr,Ni,Fe).

Был проведен анализ профиля структурных линий фазы γ -(Fe,Ni,Cr) на дифрактограммах из области больших углов 2θ на дифрактограмме. В результате анализа было установлено, что

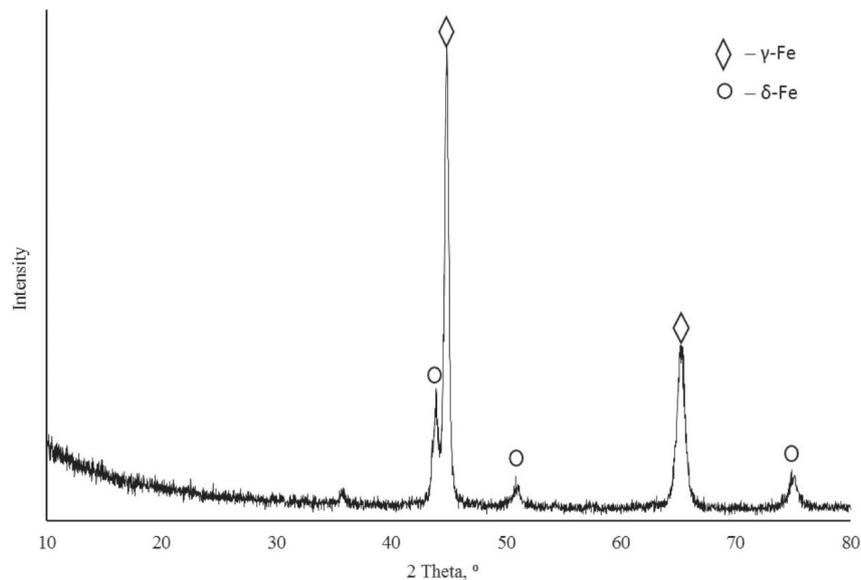


Рис. 6. Дифрактограммы от образца аустенитной стали, полученной аддитивным методом

Fig. 6. XRD analysis of WAAM-obtained AISI 308LSi steel specimens

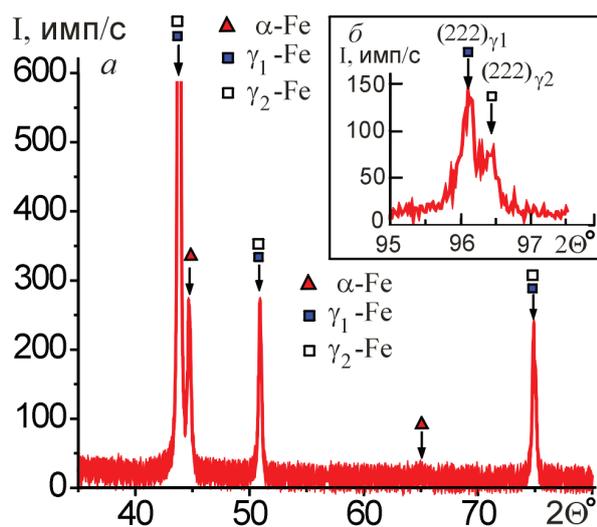


Рис. 7. Дифрактограмма от образца с плоскости параллельно спекаемым слоям (а) и фрагмент участка дифрактограммы со структурной линией (222) фазы γ -(Fe,Cr,Ni) (б)

Fig. 7. Diffraction patterns of the specimen with the plane parallel to the sintered layers (a) and a fragment of the diffraction pattern with structural line (222) of the γ -(Fe,Cr,Ni) phase (b)

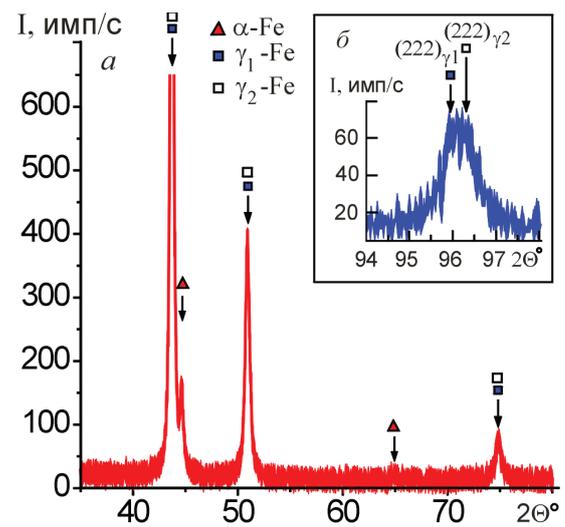


Рис. 8. Дифрактограмма от образца с плоскости перпендикулярно спекаемым слоям (а) и фрагмент участка дифрактограммы со структурной линией (222) фазы γ -(Fe,Cr,Ni) (б)

Fig. 8. Diffraction patterns of the specimen with the plane perpendicular to the sintered layers (a) and a fragment of the diffraction pattern with structural line (222) of the γ -(Fe,Cr,Ni) phase (b)

профиль структурных линий (222), (400) и (331) фазы γ -(Fe,Ni,Cr) из области больших углов 2θ может быть представлен в виде суперпозиции двух линий от фаз с близкими параметрами решетки. Выявленный сложный профиль структурных линий γ -(Fe,Ni,Cr) фазы свидетельствует о неоднородном химическом составе на поверх-

ности образца, состоящем из соединений на основе γ -(Fe,Ni,Cr) фазы с разным химическим составом в разных локальных участках в исследуемых образцах.

Таким образом, проведенный анализ дифрактограмм исследуемых образцов позволяет сделать вывод, что в результате неравновесных

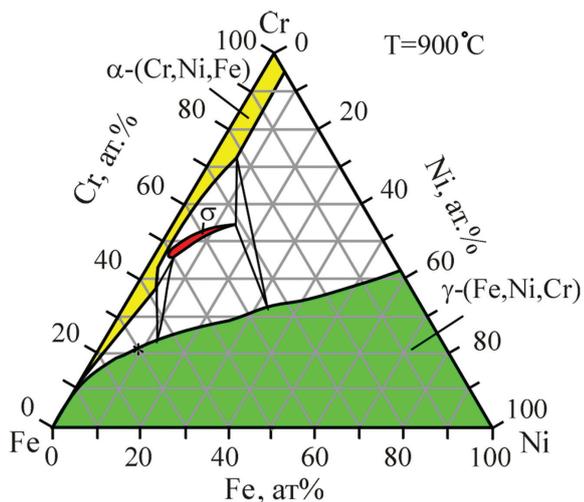


Рис. 9. Изотермическое сечение при температуре 900 °С тройной системы Fe-Cr-Ni [25]

Fig. 9. Isothermal section at 900 °C of the Fe-Cr-Ni triple system [25]

процессов при послойном образовании слитка методом электронно-лучевой наплавки происходит образование двух твердых растворов на основе γ -Fe-фазы с близкими значениями параметров решеток, которые можно условно представить как γ_1 -(Fe, Ni, Cr) и γ_2 -(Fe, Ni, Cr) фазы. Для твердого раствора γ_1 -(Fe, Ni, Cr) параметр решетки $a = 0,3592 \pm 0,0002$ нм и для γ_2 -(Fe, Ni, Cr) фазы $a = 0,3582 \pm 0,0002$ нм.

Результаты измерения микротвердости отдельных фаз полученных образцов в продольном и поперечном сечении показали, что при вдавливании индентора в области с большим содержанием δ -Fe-фазы приводит к образованию меньшего по размерам отпечатка. Это свиде-

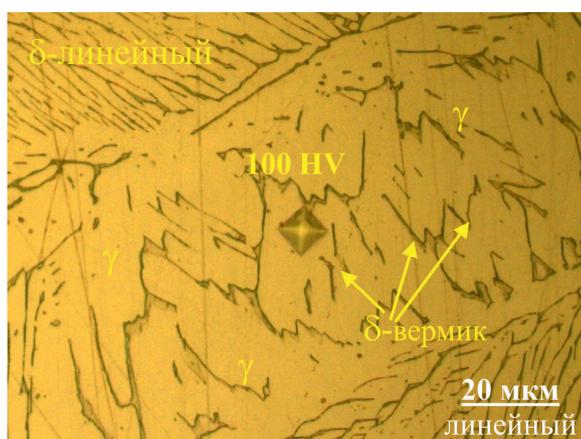
тельствует о более высокой твердости 122 HV в этих областях, чем в областях с аустенитной матрицей 100 HV (рис. 10, 11). Полученные данные свидетельствуют о том что δ -Fe-фаза является более твердой, чем аустенитная фаза на основе γ -Fe. При изготовлении деталей и конструкций с повышенной прочностью наличие δ -Fe будет оказывать отрицательное влияние на долговечность при длительных статических нагрузках и вызывать повышенную концентрацию напряжений, способствующую образованию трещин. Для увеличения долговечности изделий необходимо путем предварительной термомеханической обработки заготовки либо последующей упрочняющей термической обработки уменьшить отрицательное влияние δ -Fe возможно.

На диаграмме (рис. 11) не наблюдается заметного изменения твердости по высоте от подложки к верхнему наплавленному слою как в продольном, так и поперечном сечении. Среднее значение твердости в продольном (XOZ) сечении составляет 187 ± 7 HV, в поперечном (YOZ) – 200 ± 9 HV.

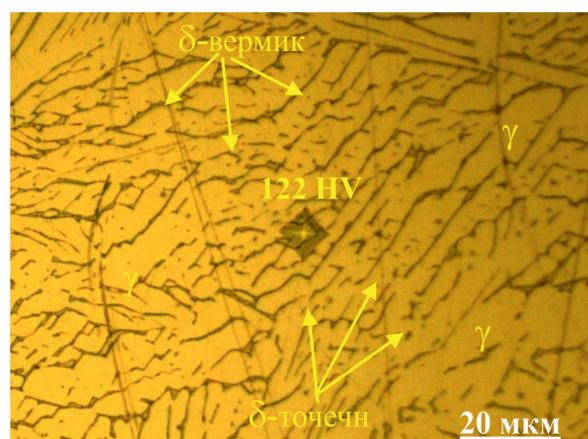
Среднее значение величины упругого последействия по результатам наноиндентирования составляет $7,24 \pm 0,63$ %.

Заклучение

Установлено, что напечатанные на разработанной установке электронно-лучевой трехмерной печати образцы из нержавеющей стали марки AISI 308LSi не содержат макродефектов во всем объеме образца. Присутствуют небольшие микродефекты в виде остаточных газовых пор,



а



б

Рис. 10. Микрофотографии с указаниями численных значений микротвердости в однофазной области с γ -Fe (а) и двухфазной области с $(\gamma+\delta)$ Fe (б)

Fig. 10. Microhardness in the zone of γ -Fe (а) and the zone of $(\gamma+\delta)$ Fe (б)

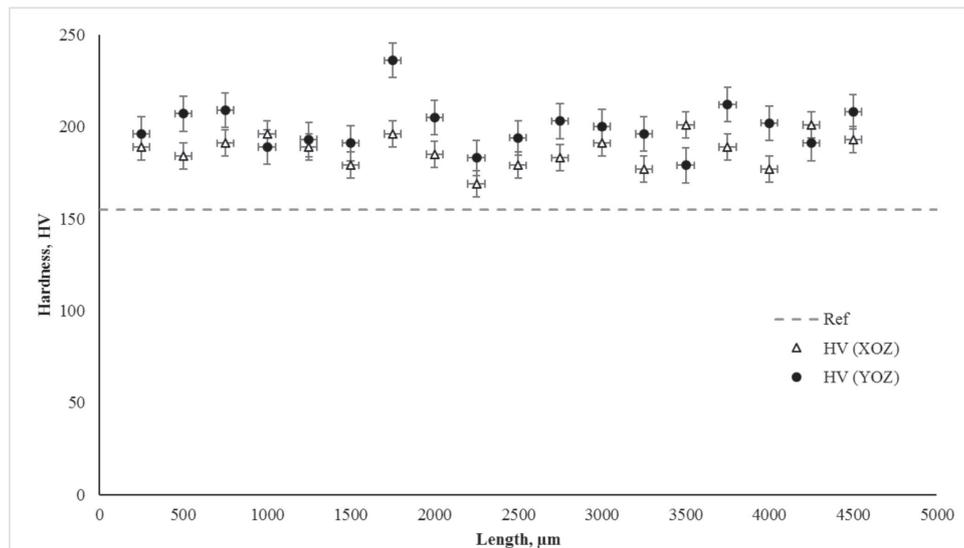


Рис. 11. Результаты измерения твердости в образце по высоте в плоскостях XOZ и YOZ

Fig. 11. Microhardness measurements along cross sections XOZ and YOZ

возникших в процессе выращивания заготовки. Размер газовых пор не более 5,2 мкм в диаметре. Микроструктура образцов формируется близкой к микроструктуре крупнозернистых литых аустенитных сталей. В структуре преобладают столбчатые зерна, направленные вдоль укладки слоев по высоте. Структурные исследования показали двухфазный характер строения. Основной фазой является аустенитная матрица на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой и включений из высокотемпературного феррита δ -Fe с ОЦК-решеткой разной формы. Установлено присутствие игольчатой, зернистой и вермикулярной формы δ -феррита. Резкой границей раздела между слоями укладки проволоки не установлено, но выявлены небольшие отличия по фазовому составу. Данные изменения отражаются на механических свойствах. Полученные результаты измерения микротвердости показывают, что она изменяется в пределах 10 %.

Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о том, что использование электронно-лучевой трехмерной печати для изготовления деталей из стали марки AISI 308LSi дает структуру, аналогичную литым аустенитным сталям. Появления макродефектов не происходит, а количество газовых пор мало.

Список литературы

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – P. 40–53. – DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.002.

2. Milevski J.O. Additive manufacturing of metals: from fundamental technology to rocket nozzles, medical implants and custom jewelry. – Cham: Springer, 2017. – 351 p. – ISBN 978-3-319-58205-4.

3. Additive manufacturing of metallic materials: a review / Y. Zhang, L. Wu, X. Guo, S. Kane, Y. Deng, Y.-G. Jung, J.-H. Lee, J. Zhang // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – Vol. 27, iss. 1. – P. 1–13. – DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.

4. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing / T. DebRoy, T. Mukherjee, H.L. Wei, J.W. Elmer, J.O. Milewski // Nature Reviews Materials. – 2020. – Vol. 6. – P. 48–68. – DOI: 10.1038/s41578-020-00236-1.

5. Edwards P., O'Conner A., Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – Vol. 135, iss. 6. – P. 061016. – DOI: 10.1115/1.4025773.

6. Tavlovich B., Shirizly A., Katz R. EBW and LBW of additive manufactured Ti6Al4V products // Welding Journal. – 2018. – Vol. 97, iss. 6. – P. 179–190. – DOI: 10.29391/2018.97.016.

7. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products / S. Peleshenko, V. Korzhyk, O. Voitenko, V. Khaskin, V. Tkachuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3/1, iss. 87. – P. 42–52. – DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666.

8. Introduction of ternary alloying element in wire arc additive manufacturing of titanium aluminide intermetallic / J. Wang, Z. Pan, L. Wei, S. He, D. Cuiuri, H. Li // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 27. – P. 236–245. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.014.



9. Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component / N. Chekir, J.J. Sixsmith, R. Tollett, M. Brochu // *Welding Journal*. – 2019. – Vol. 28, iss. 6. – P. 172–180.

10. *Taming K.M., Hafley R.A.* Electron beam free-form Fabrication for cost effective near-net shape manufacturing // NATO/RTO AVT-139 Specialists' Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing. – Amsterdam, 2006. – P. 16.

11. Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии / Н.Л. Савченко, А.В. Воронцов, В.Р. Утяганова, А.А. Елисеев, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 60–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-60-71.

12. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding / V.V. Fedorov, V.A. Klimenov, A.V. Batranin, P. Ranga // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2167. – P. 020097. – DOI: 10.1063/1.5131964.

13. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication / V.A. Klimenov, V.V. Fedorov, M.S. Slobodyan, N.S. Pushilina, I.L. Strelkova, A.A. Klopotov, A.V. Batranin // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – Vol. 29, iss. 11. – P. 7710–7721. – DOI: 10.1007/s11665-020-05223-9.

14. *Simar A., Godet S., Watkins T.R.* Highlights of the special issue on metal additive manufacturing // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 143. – P. 1–4. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.013.

15. 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 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99. – P. 2353–2363. – DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

16. 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.

17. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc addi-

tive manufacture process / X. Xu, S. Ganguly, J. Ding, S. Guo, S. Williams, F. Martina // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 143. – P. 152–162. – DOI: 10.1016/j.matchar.2017.12.002.

18. Особенности химического состава и структурно-фазового состояния, обусловившие снижение коррозионной стойкости деталей из стали 18Cr-10Ni / М.В. Костина, В.И. Криворотов, В.С. Костина, А.Э. Кудрашов, С.О. Мурадян // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2021. – Т. 64. – С. 217–229. – DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-217-229.

19. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting / H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G.D. Janaki Ram, T. Starr, B. Stucker // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 86. – P. 545–554. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.147.

20. Applying nondestructive testing to quality control of additive manufactured parts / N.P. Aleshin, M.V. Grigo'rev, N.A. Shchipakov, M.A. Prilutskii, V.V. Murashov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2016. – Vol. 52, iss. 10. – P. 600–609. – DOI: 10.1134/S1061830916100028.

21. Nanoindentation study of Ti6Al4V alloy nitride by low intensity plasma jet process / F. Barberi, C. Otani, C. Lepienski, W. Urruchi, H. Maciel, G. Petraconi // *Vacuum*. – 2002. – Vol. 67, iss. 3. – P. 457–461. – DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00231-2.

22. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, iss. 12. – P. 2109–2118. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.010.

23. *Ladany L., Roy L.* Mechanical behavior of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam additive fabrication // *ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. – Madison, WI, 2013. – DOI: 10.1115/MSEC2013-1105.

24. Metallurgy of a Ti-Au alloy synthesized by controlled electric resistance fusion / V. Klimenov, M. Slobodyan, Yu. Ivanov, A. Kiselev, S. Matrenin // *Intermetallics*. – 2020. – Vol. 127. – P. 106968. – DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106968.

25. *Lee B.J.* A thermodynamic evaluation of the Fe-Cr-Ni system // *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*. – 1993. – Vol. 31, iss. 4. – P. 480–489.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Structural and mechanical properties of stainless steel formed under conditions of layer-by-layer fusion of a wire by an electron beam

Vasily Fedorov^{1, a, *}, Aleksandr Rygin^{2, b}, Vasily Klimenov^{1, c}, Nikita Martyshev^{1, d}, Anatolii Klopotov^{2, 3, e}, Irina Strelkova^{1, f}, Sergey Matrenin^{1, g}, Andrey Batranin^{1, h}, Valentina Deryusheva^{1, i}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

² Tomsk State University of Architecture and Building, 2 Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russian Federation

³ National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5164-5875>, fedorov@tpu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5664-8234>, alexandr.rygin@gmail.com,
^c <https://orcid.org/0000-0001-7583-0170>, klimenov@tpu.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martyshev@tpu.ru,
^e <https://orcid.org/0000-0002-3690-0436>, klopotovaa@tsuab.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-2222-2865>, strelkova@tpu.ru,
^g <https://orcid.org/0000-0002-2188-8120>, mstv@tpu.ru, ^h <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>, batranin@tpu.ru,
ⁱ <https://orcid.org/0000-0002-2116-3891>, vderusheva@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 02 September 2021

Revised: 16 September 2021

Accepted: 23 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Additive technologies
 Electron beam surfacing
 Stainless steel
 Coarse austenitic steel

Funding

This research was supported by TPU development program.

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. As of today, additive technologies are among the most promising methods to manufacture various parts. They allow producing parts of complex shapes and provide their quality structure. The quality of the structure formed depends on numerous parameters: equipment type, its operation mode, materials, shielding medium, etc. Large international companies producing 3D-printers provide technological guidelines for working on it. Such guidelines include the information on the manufacturers of raw materials (printing powders), products their equipment can work with and the operation modes that should be used with such powders. These parameters should be investigated to use it on the domestic equipment developed within the framework of research programs and import substitution programs. The researchers and developers of 3D-printing equipment frequently run into a problem of using currently available raw materials for obtaining parts possessing minimal porosity, uniform structure and mechanical properties similar to that of at least cast blanks. One of the widely used materials for 3D-printing is stainless steel. It has high corrosion resistance, which reduces the requirements to the medium in which 3D printing is carried out. Manufactured stainless steel products have a good combination of strength and plastic characteristics. **The aim of the study** is to obtain stainless steel specimens possessing minimal number of micro- and macro-defects and uniform structure by the method of wire arc additive manufacturing using an electron-beam setup developed at Tomsk Polytechnic University. **The methods to study** the AISI 308LSi stainless steel 3D-printed specimens are as follows: XRD analysis, tomography, chemical analysis, metallographic analysis, microhardness testing. **Results and discussion.** It is established that the AISI 308LSi stainless steel specimens manufactured using the electron-beam 3D-printing setup contain no macro-defects in the bulk of the specimens. There are small microdefects represented by residual gas pores with the dimensions of no more than 5.2 μm. The microstructure of the specimens is formed close to that of coarse-grained cast austenite steels and consists of columnar grains of the γ-Fe austenite matrix and high-temperature ferrite. The interfaces between the wire layers are not pronounced; however, there are small differences in phase composition. Based on the analysis of the results obtained, it is established that the use of electron-beam 3D-printing for the manufacture of parts from AISI 308LSi steel gives a structure similar to cast austenitic steels. Macro-defects do not appear, and the number of gas pores is small.

For citation: Fedorov V.V., Rygin A.V., Klimenov V.A., Martyshev N.V., Klopotov A.A., Strelkova I.L., Matrenin S.V., Batranin A.V., Deryusheva V.N. Structural and mechanical properties of stainless steel formed under conditions of layer-by-layer fusion of a wire by an electron beam. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 111–124. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-111-124. (In Russian).

* Corresponding author

Fedorov Vasily Viktorovich, Laboratory manager
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin ave.,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (3822) 606006, e-mail: fedorov@tpu.ru

References

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 2015, vol. 5, pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.002.
2. Milevski J.O. *Additive manufacturing of metals: from fundamental technology to rocket. nozzles, medical implants and custom jewelry*. Cham, Springer, 2017. 351 p. ISBN 978-3-319-58205-4.
3. Zhang Y., Wu L., Guo X., Kane S., Deng Y., Jung Y.-G., Lee J.-H., Zhang J. Additive manufacturing of metallic materials: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, vol. 27, iss. 1, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.
4. DebRoy T., Mukherjee T., Wei H.L., Elmer J.W., Milewski J.O. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing. *Nature Reviews Materials*, 2020, vol. 6, pp. 48–68. DOI: 10.1038/s41578-020-00236-1.
5. Edwards P., O’Conner A., Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, vol. 135, iss. 6, p. 061016. DOI: 10.1115/1.4025773.
6. Tavlovich B., Shirizly A., Katz R. EBW and LBW of additive manufactured Ti6Al4V products. *Welding Journal*, 2018, vol. 97, iss. 6, pp. 179–190. DOI: 10.29391/2018.97.016.
7. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analisis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3/1, iss. 87, pp. 42–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666.
8. Wang J., Pan Z., Wei L., He S., Cuiuri D., Li H. Introduction of ternary alloying element in wire arc additive manufacturing of titanium aluminide intermetallic. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 236–245. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.014.
9. Chekir N., Sixsmith J.J., Tollett R., Brochu M. Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component. *Welding Journal*, 2019, vol. 28, iss. 6, pp. 172–180.
10. Taminger K.M., Hafley R.A. Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing. *NATO/RTO AVT-139 Specialists’ Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing*, Amsterdam, 2006, p. 16.
11. Savchenko N.L., Vorontsov A.V., Utyaganova V.R., Eliseev A.A., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Osobennosti strukturno-fazovogo sostoyaniya splava Ti-6Al-4V pri formirovanii izdelii s ispol’zovaniem elektronno-luchevoi provolochnoi additivnoi tekhnologii [Features of the structural-phase state of the alloy Ti-6Al-4V in the formation of products using wire-feed electron beam additive manufacturing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 60–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-60-71.
12. Fedorov V.V., Klimenov V.A., Batranin A.V., Ranga P. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2167, p. 020097. DOI: 10.1063/1.5131964.
13. Klimenov V.A., Fedorov V.V., Slobodyan M.S., Pushilina N.S., Strelkova I.L., Klopotov A.A., Batranin A.V. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29, iss. 11, pp. 7710–7721. DOI: 10.1007/s11665-020-05223-9.
14. Simar A., Godet S., Watkins T.R. Highlights of the special issue on metal additive manufacturing. *Materials Characterization*, 2018, vol. 143, pp. 1–4. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.013.
15. 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. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.
16. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Shamarin N.N., Shamarin N., Fortuna S.V., Maier G.G., E.A. Kolubaev. 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.
17. Xu X., Ganguly S., Ding J., Guo S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process. *Materials Characterization*, 2018, vol. 143, pp. 152–162. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.12.002.
18. Kostina M.V., Krivorotov V.I., Kostina V.S., Kudrashov A.E., Muradyan S.O. Osobennosti khimicheskogo sostava i strukturno-fazovogo sostoyaniya, obuslovivshie snizhenie korrozionnoi stoikosti detalei iz stali 18Cr-10Ni [Features of chemical composition and structural-phase state decreasing corrosion resistance of parts from 18Cr-

10Ni steel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, pp. 217–229. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-217-229. (In Russian).

19. Gong H., Rafi K., Gu H., Janaki Ram G.D., Starr T., Stucker B. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting. *Materials and Design*, 2015, vol. 86, pp. 545–554. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.147.

20. Aleshin N.P., Grigo'rev M.V., Shchipakov N.A., Prilutskii M.A., Murashov V.V. Applying nondestructive testing to quality control of additive manufactured parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, iss. 10, pp. 600–609. DOI: 10.1134/S1061830916100028.

21. Barberi F., Otani C., Lepiensi C., Urruchi W., Maciel H., Petraconi G. Nanoindentation study of Ti6Al4V alloy nitride by low intensity plasma jet process. *Vacuum*, 2002, vol. 67, iss. 3, pp. 457–461. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00231-2.

22. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 12, pp. 2109–2118. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.010.

23. Ladany L., Roy L. Mechanical behavior of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam additive fabrication. *ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Madison, WI, 2013. DOI: 10.1115/MSEC2013-1105.

24. Klimenov V., Slobodyan M., Ivanov Yu., Kiselev A., Matrenin S. Metallurgy of a Ti-Au alloy synthesized by controlled electric resistance fusion. *Intermetallics*, 2020, vol. 127, p. 106968. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106968.

25. Lee B.J. A thermodynamic evaluation of the Fe-Cr-Ni System. *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, 1993, vol. 31, iss. 4, pp. 480–489.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Ускоренная оценка влияния технологических факторов на прочностные характеристики Ti-6Al-4V и Al-Cu-Mg

Кирилл Захарченко^{1, 2, a, *}, Владимир Капустин^{2, 1, b}, Алексей Ларичкин^{1, 3, c}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ Новосибирский государственный исследовательский университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2626-6184>,  zaharchenkok@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6124-2503>,  macler06@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7306-9522>,  larichking@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.389:539.43: 620.178.3

История статьи:

Поступила: 04 августа 2021

Рецензирование: 16 сентября 2021

Принята к печати: 23 сентября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Ускоренная оценка

Циклическое нагружение

Упругопластическое деформирование

Деформационные характеристики

Диссипативные характеристики

Метод конечных элементов

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-48-543028.

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема прочности конструкционных материалов при циклических нагрузках имеет важное значение в конструировании. Значительное количество факторов, которые влияют на характеристики сопротивления усталостному разрушению, предопределило создание многочисленных методов, учитывающих это влияние. Неразрушающие методы, основанные на связи физических процессов деградации материала с деформационными характеристиками, позволяют экспериментально оценивать усталостные свойства материалов. **Цель работы:** анализ процессов диссипации энергии и накопления деформаций, происходящих при неупругом циклическом деформировании образцов на примере титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) и алюминиевого сплава Д16 (Al-Cu-Mg) до и после технологического воздействия. **В работе экспериментально исследованы** физические процессы деградации образцов (сплавы ВТ6 и Д16), которые сопровождают процесс усталостного повреждения материалов при однородном и неоднородном НДС в области концентратора (в виде отверстия и сварного шва). Используются типовые режимы выхода на режим усталостных испытаний, позволяющие определить критические напряжения в образце материала – напряжение, при котором происходит изменение физических свойств (температуры, деформации) без доведения образцов до усталостного разрушения. Выполнено сравнение критических амплитуд напряжений в цикле для экспериментальных данных и результатов математического моделирования. При помощи метода конечных элементов (МКЭ) оценено влияние концентраторов напряжений на значение критических нагрузок, которые способны выдержать деталь после технологической операции. **В результате** дана оценка влияния эксплуатационно-технологических факторов на величину критических напряжений, определяемых по температуре и деформациям. Сравнительные испытания образцов сплава ВТ6 и Д16 с концентраторами напряжений и без концентраторов показали, что амплитуды критических напряжений по сравнению с образцами без концентраторов напряжений снижаются более чем на 30 % у материалов. Проведены малоцикловые усталостные испытания образцов из сплава Д16. Выполнено математическое моделирование циклического деформирования образцов в пакете MSC.Marc. **Обсуждаются** результаты испытаний при циклическом нагружении, показывающие, что характеристики технологического процесса уменьшают амплитуды критических напряжений сплавов ВТ6 и Д16 и ухудшают усталостные свойства алюминиевого сплава Д16. Математическое моделирование показало удовлетворительное соответствие с данными экспериментов. Такое соответствие указывает на возможность проведения качественных численных оценок начала накопления неупругой деформации в конструкциях с концентраторами напряжений при циклическом деформировании и возрастающей амплитудой напряжений с использованием классической модели упругопластического материала с упрочнением.

Для цитирования: Захарченко К.В., Капустин В.И., Ларичкин А.Ю. Ускоренная оценка влияния технологических факторов на прочностные характеристики Ti-6Al-4V и Al-Cu-Mg // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 125–139. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-125-139.

Введение

Методам определения характеристик сопротивления посвящено большое количество работ [1], включая методы, описанные в ГОСТ 25.502–79. В ускоренных методах расчетно-экспериментальной оценки предела

*Адрес для переписки

Захарченко Кирилл Владимирович, к.т.н., доцент
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-17-64, e-mail: zaharchenkok@mail.ru

выносливости материала условно можно выделить несколько основных групп.

Первая группа – регулярное нагружение с разрушением образцов при МЦУ (малоцикловая усталость) [2]. Широко используют формулу Коффина, которая включает характеристику неупругого деформирования – ширину петли гистерезиса [3]. Вторая группа методов – нагружение с использованием эффекта повышения частоты испытаний. Эта методика положила начало исследованию «бесконечной долговечности» – $10^6 \dots 10^{10}$ циклов (Батиас) [4]. В этом направлении исследователи [5, 6] первыми обратили внимание на то, что при режиме нагружения свыше 10^9 циклов возникновение трещин происходит под поверхностью образца [7]. Очаг разрушения имеет вид «Fish-eye» [8, 9]. В третьей группе рассматривается нагружение с применением программного изменения нагрузки: Локати, Про, Эномото, Вейбулла [10–12].

Общий недостаток рассмотренных выше трех групп ускоренных методов – разрушение большого количества образцов, большая погрешность – реально оценивать только циклически стабильные материалы, что ограничивает представленные методы. Кроме того, указанные выше методы не связаны с изучением физических процессов, которые происходят в структуре материала на разных масштабных уровнях под действием внешней нагрузки.

Четвертая группа: циклическое нагружение без доведения образцов до разрушения. В косвенных методах величина предела выносливости связана с характеристиками механических свойств или физическими явлениями металлов, которые сопутствуют процессу усталости. Эти методы основаны на установлении связи пределов выносливости с напряжениями, при которых в исследуемом материале начинают появляться необратимые эффекты, связанные с усталостными повреждениями. Физической основой неразрушающих методов являются структурно-чувствительные характеристики и сопутствующие явления, происходящие в материале в процессе периодического нагружения [21–48]: фазовые превращения в материале [13–16], где наблюдают превращения в сплавах по типу мартенситных; микротвердость [17]; искажение кристаллической решетки металла [18]; изменение характеристик магнитного сопротивления, маг-

нитного гистерезиса, вихревых токов [19–21]; изменение рельефа поверхности [22, 23]; акустическая эмиссия [24]; интенсификация необратимого рассеяния энергии или неупругих деформаций [22]; изменение микроструктуры [9, 23, 24] и т. д. Существуют методы, в которых накопление повреждения связывается с изменением различных интегральных характеристик рассеяния энергии в металле, основанные на измерении коэффициента поглощения, логарифмического декремента колебаний, температуры в очаге разрушения [25–30].

Основной целью исследования является обнаружение физических явлений, сопутствующих процессу циклического нагружения в переходной области от упругого к неупругому деформированию, анализ диссипации энергии и накопления деформаций, происходящих при неупругой циклической деформации при постоянных ненулевых средних напряжениях. При этом раскрывается влияние технологического воздействия на определяемые характеристики. Дальнейшие исследования посвящены обсуждению подходов к моделированию этих явлений.

Методика исследований

Образцы для испытаний

Партия образцов для исследования изготавливалась из листа высокопрочного титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) и листа алюминиевого сплава Д16 (Al-Cu-Mg). Выбор этих материалов обусловлен тем, что оба сплава широко применяются в самолетостроении. Алюминиевый сплав Д16 исторически является основным материалом в области авиастроения. Титановый сплав ВТ6 применяется, например, для изготовления дисков и лопаток первых ступеней ГТД. Эти материалы поставляются в различном виде: поковки, штамповки, прутки, плиты и листы.

История деформирования полуфабрикатов создается на этапе их изготовления, при котором на материал воздействуют разнообразные технологические процессы: прокатка, волочение,ковка, механическая обработка резанием, термическая обработка и др. Технологические факторы, предшествующие испытанию образца материала на сопротивление усталостному разрушению, оказывают сильное влияние на долговечность образца.

В исследовании используются образцы типа IV по ГОСТ 25.502–79 (рис. 1). Длина рабочей части образца составляет 50 и 45 мм, что позволяет установить два экстензометра для измерения осевой и поперечной деформации. Образцы из сплава ВТ6 были разделены на две серии: гладкие (рис. 1, а) и с концентратором напряжений в виде отверстия ($d = 1,5$ мм) в центре рабочей части (рис. 1, б). Толщина образца $h = 2,1$ мм, ширина $b = 9$ мм, значение коэффициента концентрации $\alpha_\sigma = 6,49$. Образцы из сплава Д16 были также разделены на две серии: гладкие (рис. 1, в) и с концентратором напряжений в виде сварного шва (рис. 1, г). Толщина образца из сплава Д16 $h = 1,5$ мм, ширина $b = 12$ мм. Шов был получен при помощи лазерной сварки. Ширина шва равна толщине образца. Прочность шва составляла 0,85 от прочности основного материала.

Исследования позволяют дать оценку влияния конструктивных факторов (концентраторов напряжений) на изменение характеристик состояния материала при циклическом нагружении (как следствие, на сопротивление материала усталостному разрушению). Измерения деформаций проводились на базе 25 мм при помощи экстензометра.

Диаграмма деформирования при растяжении образцов ВТ6 и Д16 представлена на рис. 2. Механические свойства материала ВТ6:

– временное сопротивление разрушению $\sigma_B = 1045$ МПа (Δ);

– предел текучести $\sigma_{0,2} = 881$ МПа (\blacktriangle);

– модуль упругости $E = 102\,600$ МПа.

Механические свойства материала Д16:

– временное сопротивление разрушению $\sigma_B = 423$ МПа (Δ);

– предел текучести $\sigma_{0,2} = 320$ МПа (\blacktriangle);

– модуль упругости $E = 73\,400$ МПа.

Поверхность рабочей части образца, предназначенную для измерения температуры при помощи тепловизора, покрывали тонким слоем аморфного углерода, что позволяет коэффициент черноты приблизить к единице.

Экспериментальные исследования, выполняемые с измерением одновременно двух компонентов тензора деформаций и радиационной температуры поверхности, позволяют обеспечить полноту данных при решении задач идентификации свойства материала и в исследовании процессов накопления необратимых деформаций и диссипации энергии образцом.

Оборудование

Для нагружения образцов материала ВТ6 и Д16 использовалась испытательная универсальная система Instron 8801 (Англия). При испытании реализовывалось мягкое нагружение. Для измерения приращения компонентов

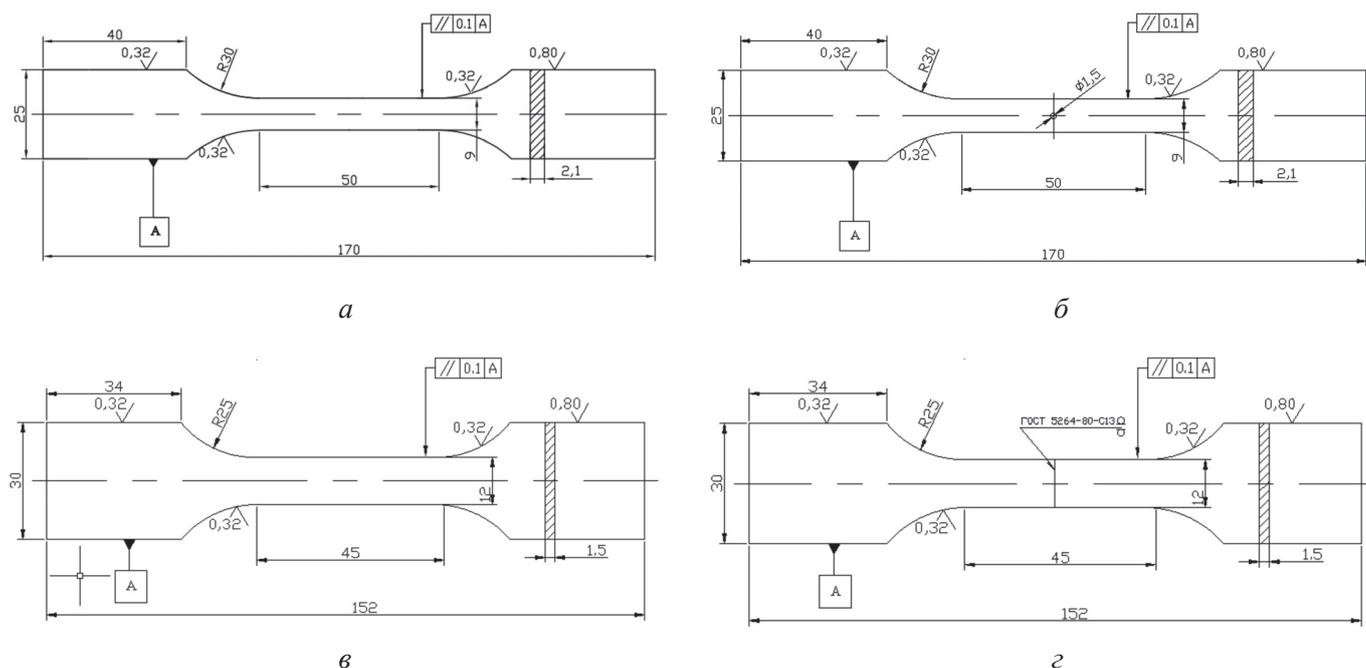


Рис. 1. Образцы для испытаний

Fig. 1. Samples for testing



Рис. 2. Диаграммы деформирования при растяжении образцов VT6 и D16

Fig. 2. Tensile stress diagrams for VT6 and D16 samples

тензора полных деформаций *in situ* использовались штатные экстензометры: № 2620-601 «Dynamic Extensometer», «Transverse/Diametral Extensometer» №W-E-404-F. Измерение температуры выполнялось при помощи тепловизора ImageIR «InfraTec» 8355 с температурным разрешением 0.02 К (Германия).

Метод определения критического напряженно-деформированного состояния материала при циклическом нагружении

В работе требовалось определить критическую амплитуду напряжения при циклическом нагружении образца материала по изменению деформированного состояния и диссипативного разогрева.

Для этого использовалась методика, в которой критические напряжения могут быть определены с помощью диаграммы накопления необратимых деформаций или по температуре диссипативного разогрева материала [26, 27, 32].

При испытаниях образец, находящийся в термодинамическом равновесии, подвергался мягкому нагружению с некоторой постоянной средней составляющей цикла напряжений и монотонно увеличивающейся амплитудой напряжения, например, увеличивающейся пропорционально времени. Нагружение с постоянной средней составляющей цикла позволяло исключить влияние среднего напряжения и получить амплитудные зависимости характеристик деформированного состояния и температуры от амплитуды напряжения.

Схема типовой программы нагружения, изображенная на рис. 3, представляла собой блок нагружения, состоящий из 4 шагов, в которых выполнялось:

- квазистатическое деформирование (шаг 1 «Step 1»),
- выдержка при этом напряжении в течение 180 с (шаг 2 «Step 2»),
- мягкое нагружение при ступенчатом увеличении амплитуды напряжения (шаг 3 «Step 3»),
- разгрузка (шаг 4 «Step 4»).

Шаг 3 содержал 2640 циклов нагружения по гармоническому закону с частотой 4 Гц с общей длительностью испытания 660 секунд. Выдержка на втором шаге испытания необходима для установления термодинамического равновесия в образце после его нагружения на первом шаге.

Величина приращения амплитуды нагрузки для каждой ступени $\sigma_{a \text{ step}}$ высчитывалась

по формуле: $\sigma_{a \text{ step}} = \frac{\sigma_{a \text{ max}}}{N_{\text{cycle}}}$, где $\sigma_{a \text{ max}}$ – мак-

симальная амплитуда напряжения в шаге 3; N_{cycle} – количество циклов на третьем шаге.

Во время испытаний одновременно измерялись нагрузка, осевая, поперечная деформация и радиационная температура рабочей поверхности образца. Испытания проводились при комнатной температуре.

После выполнения программы испытаний данные измерений анализировались и опреде-

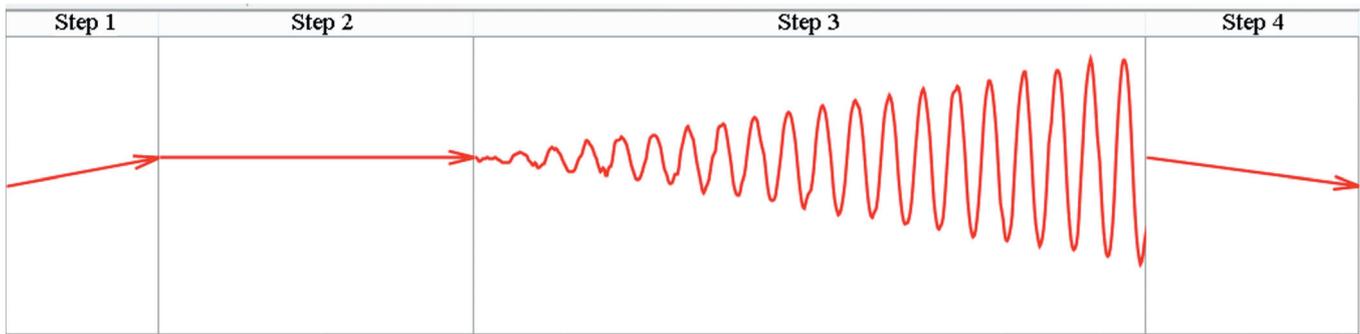


Рис.3. Блок нагружения:

шаг 1 – квазистатическое нагружение; шаг 2 – выдержка; шаг 3 – циклическое нагружение со ступенчато увеличивающейся амплитудой напряжения; шаг 4 – разгрузка

Fig. 3. A single loading block:

step 1: quasi-static loading; step 2: holding under constant stress; step 3: harmonic cyclic loading with linearly increasing stress amplitude; step 4: unloading

лялись экстремальные значения деформаций и температуры для каждого экстремального напряжения в программе испытаний.

Полученные данные позволили выделить из полных деформаций образца составляющие, связанные с необратимым деформированием, а также из изменения температуры части, связанные с термоупругим и диссипативным разогревом образца, и определить критическое напряжение образца, выше которого процесс становится необратимым.

Основные результаты и обсуждение

Деформационные характеристики образцов (сплавы ВТ6 и Д16) с концентратором напряжений и без него при циклическом нагружении

Для образцов из титанового сплава ВТ6 в состоянии поставки на рис. 4 представлены сопоставления зависимостей приращений средних значений температуры (ΔT_m) с зависимостями деформации вышагивания (ϵ_{xm}^p , формула (1)) от амплитуды напряжения (σ_a) (рис. 4, а). На рис. 4, б представлены сопоставления зависимостей приращений средних значений температуры (ΔT_m) с амплитудами необратимых продольных деформаций (ϵ_{xa}^p , формула (2)) от амплитуды напряжения (σ_a). Здесь:

$$\epsilon_{xm}^p = \epsilon_{xm} - \epsilon_{xm0}, \tag{1}$$

$$\epsilon_{xa}^p = \epsilon_{xa} - \frac{\sigma_a}{E_{d0}}, \tag{2}$$

где

$$\epsilon_{xm} = \frac{\epsilon_{x \max} + \epsilon_{x \min}}{2};$$

$$\epsilon_{xa} = \frac{\epsilon_{x \max} - \epsilon_{x \min}}{2}$$

– средние и амплитудные значения полной продольной деформации; $\epsilon_{x \max}$, $\epsilon_{x \min}$ – экстремальные значения продольных деформаций; ϵ_{xm0} – полная продольная деформация после завершения шага 2 программы нагружения, σ_m ; $E_{d0} = \frac{\sigma_a}{\epsilon_{xa}}$ – секущий динамический модуль упругости, вычисляется в начале шага 3, где неупругие деформации незначительны.

На рис. 4 представлены зависимости средней температуры и составляющих пластической деформации от амплитуды напряжения. Цифрами 1 и 2 обозначены зависимости для образцов с отверстием и без отверстия соответственно. Среднее напряжение было задано $\sigma_m = 476$ МПа, максимальная амплитуда напряжения $\sigma_{a \max} = 529$ МПа. Если эксперименты выполнить для иных средних напряжений, то можно оценить влияние среднего напряжения, в цикле нагружения на величину амплитуды напряжения при котором начинается диссипативный разогрев и активизируется процесс накопления необратимых деформаций.

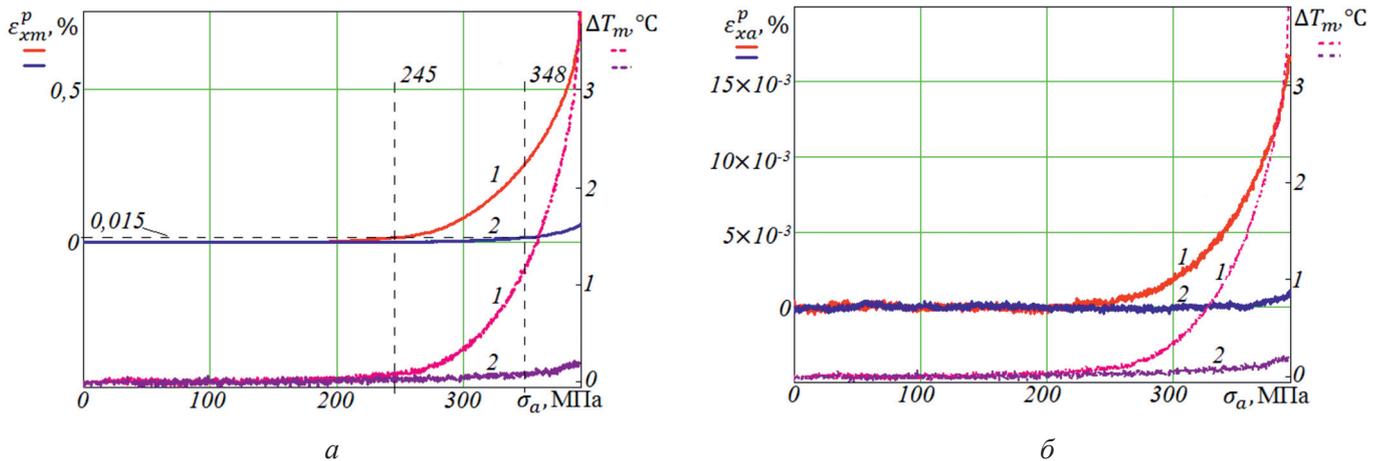


Рис. 4. Эволюция параметров в зависимости от амплитуды напряжения для образцов ВТ6 с отверстием 1 и без отверстия 2; а – изменение средней температуры и средней пластической осевой деформации; б – изменение средней температуры и амплитуды пластической осевой деформации

Fig. 4. Evolution of parameters as a function of the stress amplitude for VT6 (Ti-6Al-4V) samples with 1 and without a hole 2; а – evolution of the temperature and the plastic mean axial strain; б – evolution of the temperature and the plastic axial strain mplitude

Наличие концентратора у образца в виде отверстия при периодическом деформировании с постоянным средним напряжением в цикле уменьшает величину амплитуды напряжения (σ_a), при котором активизируется процесс пластической деформации материала (рис. 4, а), наблюдаются нелинейное изменение средней пластической осевой деформации и приращение средней температуры диссипативного разогрева образца.

Представленная диаграмма дает возможность оценить предел циклической упругости материала ВТ6 (рис. 4, а). Средние значения необратимой пластической деформации (ε_{xm}^p) у образцов с отверстием и приращение средней температуры (ΔT_m) возникают при амплитуде напряжения выше 245 МПа, для гладких образцов – при 348 МПа соответственно (при этом $\varepsilon_{xm}^p = 0,015\%$). Это наблюдение согласуется с известным разупрочняющим воздействием среднего напряжения при усталости металлов, которое обычно оценивается по диаграммам Naigh. При амплитуде напряжения 348 МПа (рис. 4, а) средняя составляющая необратимой продольной деформации (ε_{xm}^p) и приращений температуры (ΔT_m) больше в 16 и 10 раз соответственно у образцов с концентратором, чем у образцов без концентратора.

Из рис. 4, б также видно, что наличие концентратора у образца из сплава ВТ6 приводит к тому, что амплитуда пластической осевой деформации имеет более высокое значение у образца с отверстием. При амплитуде напряжений (σ_a), близкой к 400 МПа, происходит увеличение амплитуды необратимых деформаций (ε_{xa}^p) на 0,017 % у образцов с концентратором напряжения.

Наличие концентратора напряжений при периодическом деформировании образцов симметричным циклом напряжений со средней составляющей приводит к уменьшению критического напряжения, при котором активизируются необратимые процессы, на 30 %. Это наблюдение согласуется с математическим расчетом, представленным в разделе «Сравнение экспериментальных данных и результатов математического моделирования».

Для ответа на вопрос о влиянии концентратора напряжений на диссипативный разогрев и среднее (амплитудное) значение деформации в цикле (вышагивание петли пластического гистерезиса) образец из алюминиевого сплава Д16 со сварным швом и без него нагружался по аналогичной программе (рис. 3) со средним напряжением в цикле (σ_m) и максимальной амплитудой напряжения цикла ($\sigma_{a\max}$), равными 167 МПа.

На рис. 5 показано, что в образце материала Д16 с концентратором напряжений (сварным швом) увеличение средней пластической деформации (вышагивание петли пластического гистерезиса) и нагрев, вызванный пластичностью, происходят намного раньше, чем у гладких образцов (без концентратора напряжений). Напомним, что эти результаты соответствуют фиксированному среднему напряжению $\sigma_m = 167$ МПа.

Так, из рис. 5, *a* видно, что у образцов Д16 со сварным швом средние значения необратимой пластической деформации (ε_{xm}^p) и приращение средней температуры (ΔT_m) возникают при амплитуде напряжения выше 80 МПа, для гладких образцов – при 130 МПа соответственно (при этом $\varepsilon_{xm}^p = 0,02$ %). Приращение средней и амплитудной составляющих температуры происходит с минимальным расхождением до амплитуды напряжений 100 МПа. При амплитуде напряжения 130 МПа (рис. 4, *a*) средняя составляющая необратимой продольной деформации (ε_{xm}^p) и приращений температуры (ΔT_m) больше в 30 раз и в 2 раза соответственно у образцов со сварным швом, чем у образцов без сварного шва.

Из рис. 5, *b* также видно, что сварной шов у образца сплава Д16 приводит к тому, что ампли-

туда пластической осевой деформации имеет более высокое значение у образца с концентратором. При амплитуде напряжений (σ_a), близкой к 160 МПа, происходит увеличение амплитуды необратимых деформаций (ε_{xa}^p) на 0,03 % у образцов с концентратором напряжения.

При периодическом деформировании образцов со сварным швом симметричным циклом напряжений со средней составляющей приводит к уменьшению критического напряжения на 38 %.

Для образцов сплава Д16 была проведена проверка кинетики изменения средней пластической деформации и средней температуры при циклировании на третьем шаге программы (см. рис. 3) с постоянной амплитудой цикла напряжения $\sigma_a = 167$ МПа (рис. 6).

Для гладкого образца Д16 (рис. 6, *a*) среднее значение температуры монотонно росло при циклировании (с $\Delta T_m = 0,4$ °С до $\Delta T_m = 0,67$ °С) при постоянной амплитуде напряжения $\sigma_a = 167$ МПа. При этом значение осевой пластической деформации оставалось постоянным $\varepsilon_{xm}^p \approx 1$ %. В то же время для образца Д16 со сварным швом среднее значение температуры падало при циклировании (с $\Delta T_m = 0,8$ °С до $\Delta T_m = 0,55$ °С) при постоянной амплитуде напряжения $\sigma_a = 167$ МПа. При этом значение осевой пластиче-

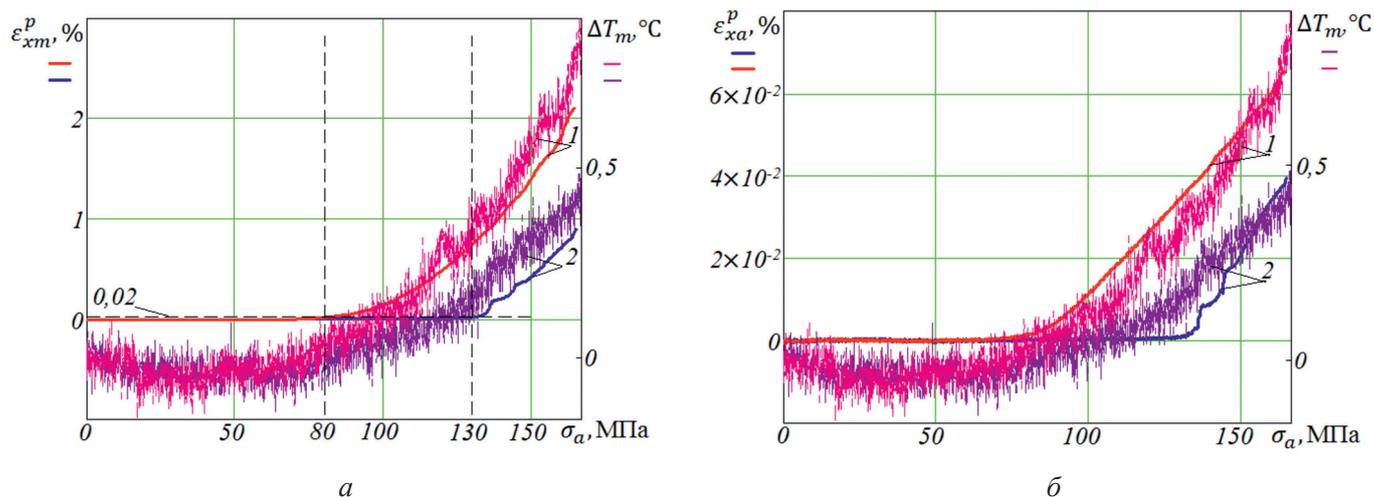


Рис. 5. Эволюция параметров в зависимости от амплитуды напряжения для образцов Д16 со сварным швом 1 и без шва 2; *a* – изменение средней температуры и средней пластической осевой деформации; *b* – изменение средней температуры и амплитуды пластической осевой деформации

Fig. 5. Evolution of parameters as a function of the stress amplitude for D16 (Al-Cu-Mg) samples with 1 and without a weld 2; *a* – evolution of the temperature and the average plastic axial strain; *b* – evolution of the temperature and the plastic axial strain amplitude

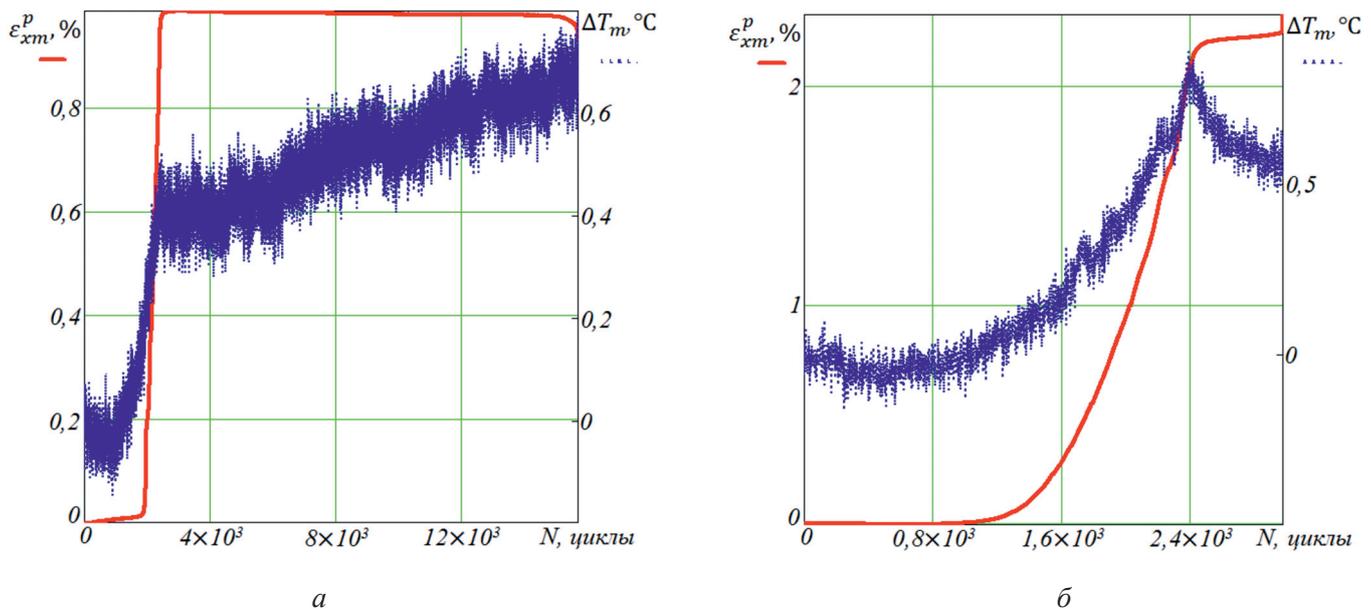


Рис. 6. Эволюция средней температуры и средней пластической осевой деформации в зависимости от числа циклов для образцов:

a – D16 без сварного шва; *б* – D16 со сварным швом

Fig. 6. Evolution of the temperature and the plastic mean axial strain versus the number of loading cycles for specimens:

a – D16 (Al-Cu-Mg) without a weld; *б* – D16 (Al-Cu-Mg) with a welded seam

ской деформации оставалось постоянным – более $\varepsilon_{xm}^p \approx 2,2\%$.

Средние значения долговечностей при этом на исследуемом уровне нагружения сплава D16 равны $2,9 \cdot 10^3$ и $15,7 \cdot 10^3$ циклов соответственно для образцов со сварным швом и без него. Таким образом, получено уменьшение характеристик малоциклового усталости для образцов со сварным швом более чем в 5 раз. Это показывает чувствительность метода к концентратору напряжений.

Можно предположить, что при периодическом асимметричном деформировании образца за пределом упругости в материале реализуются два эффекта деформирования.

Первый эффект сопровождается увеличением условного напряжения текучести (упрочнение,) при котором обнаруживается накопление необратимых средних деформаций (вышагивание петли пластического гистерезиса). Этот эффект аналогичен ползучести материала. Второй эффект сопровождается одновременным увеличением амплитуды необратимых деформаций и приращением температуры диссипативного разогрева, что сопровождается ухудшением проч-

ностных свойств. Эти эффекты требуют дальнейшего исследования.

Повышение температуры и накопление средней пластической деформации имеют одинаковую тенденцию: эти процессы начинаются при меньших амплитудах напряжений для образцов с концентратором напряжений.

Результаты экспериментальных исследований показывают принципиальную возможность описания процессов деградации при циклическом нагружении. Метод позволит также оценивать влияние технологических воздействий, которым подвергался ранее образец материала. Кроме того, метод может быть использован как альтернатива разрушающим методам испытаний конструкций на прочность и оценки характеристик сопротивления усталостному разрушению металлических материалов.

Сравнение экспериментальных данных и результатов математического моделирования

Проведено сравнение результатов конечно-элементного моделирования (МКЭ) циклического растяжения полосы из ВТ6 с отверстием и полосы без отверстия, а также полосы из D16 со

швом и полосы без шва. Модели представляли собой четверть образца с базой измерения $L_0 = 12,5$ мм. На поверхностях, совпадающих с плоскостями координат Oxz и Oyz , задавались условия симметрии. К верхней поверхности образцов прикладывалась нагрузка, история которой соответствовала таковой в эксперименте. Значения параметров упругости и пластичности материала принимались соответствующими сплавам ВТ6 и Д16. Материал шва для образца из Д16 принимался таким же, как и для основного материала, но со сниженным пределом текучести и прочности, равными 0,85 от $\sigma_{0,2}$ и σ_B . Предельная деформация материала шва была принята равной 1,15 от предельной для основного материала Д16 (см. рис. 2). На рис. 7 представлены расчетные деформированные конфигурации и значения интенсивности полной деформации для образцов из рассматриваемых сплавов.

На рис. 8 представлены диаграммы зависимости средней составляющей деформации

базы измерений образца в цикле от амплитуды напряжения в цикле плоского образца с отверстием из ВТ6 (рис. 8, а) и для плоского образца со сварным швом после лазерной сварки (рис. 8, б). Линии 1 соответствуют данным моделирования циклической деформации плоских образцов с концентраторами напряжений (отверстием для образца из ВТ6 и сварным швом для образца из Д16), линиями 2 обозначены данные для образцов соответствующих размеров для каждого сплава без концентраторов напряжений.

Можно отметить удовлетворительное соответствие амплитуд напряжений между экспериментальными значениями и результатами математического моделирования. При данных амплитудах напряжений наступает необратимое накопление деформации образца на базе измерений 25 мм. Сведения о размерах образцов и амплитудах напряжений приведены в таблице.

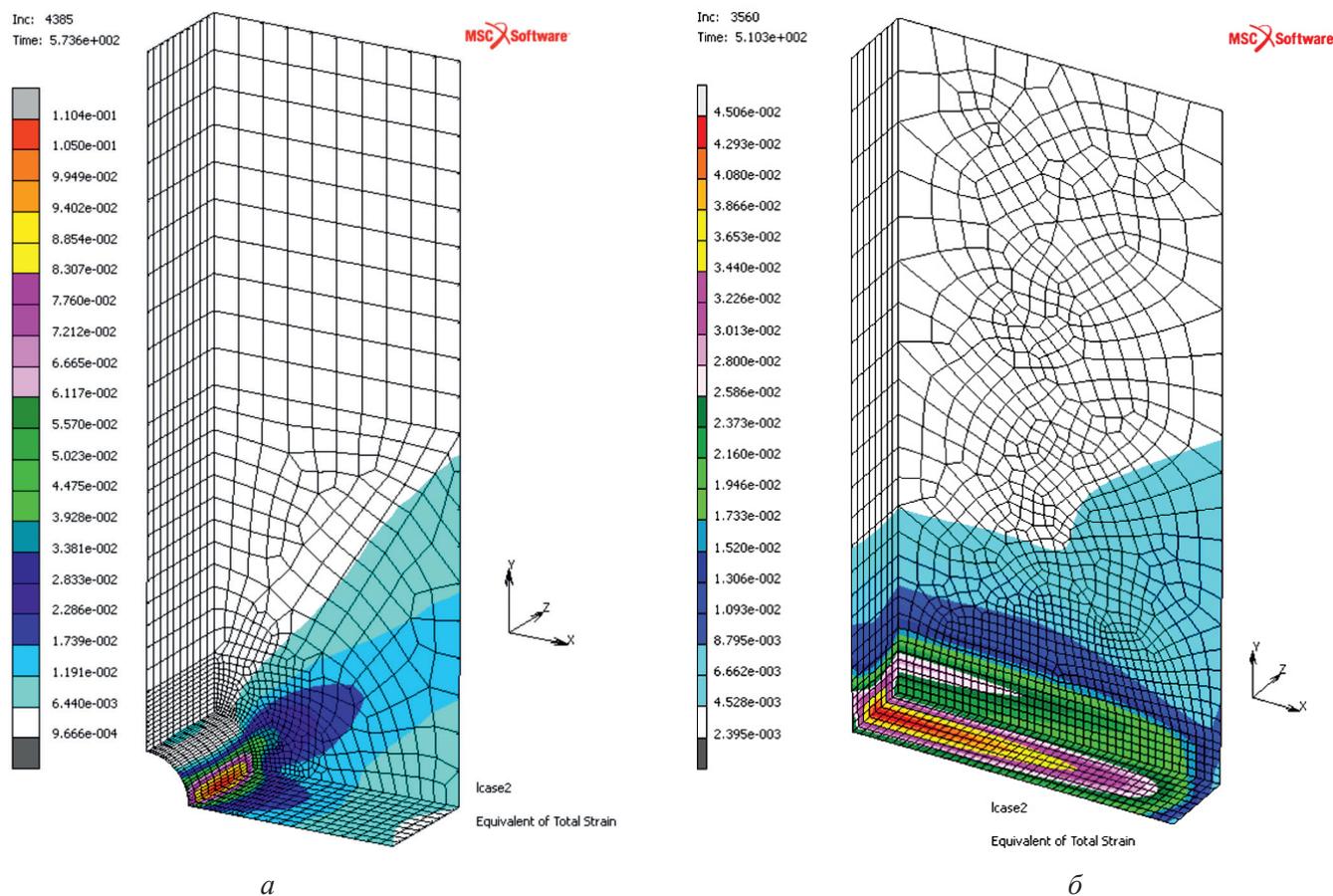


Рис. 7. Распределение интенсивности полной деформации для образцов:

а – из сплава ВТ6 с отверстием; б – из сплава Д16 со сварным швом

Fig. 7. Distribution of total strain intensity for samples:

а – from VT6 (Ti-6Al-4V) alloy with a hole; б – from D16 (Al-Cu-Mg) alloy with a laser weld

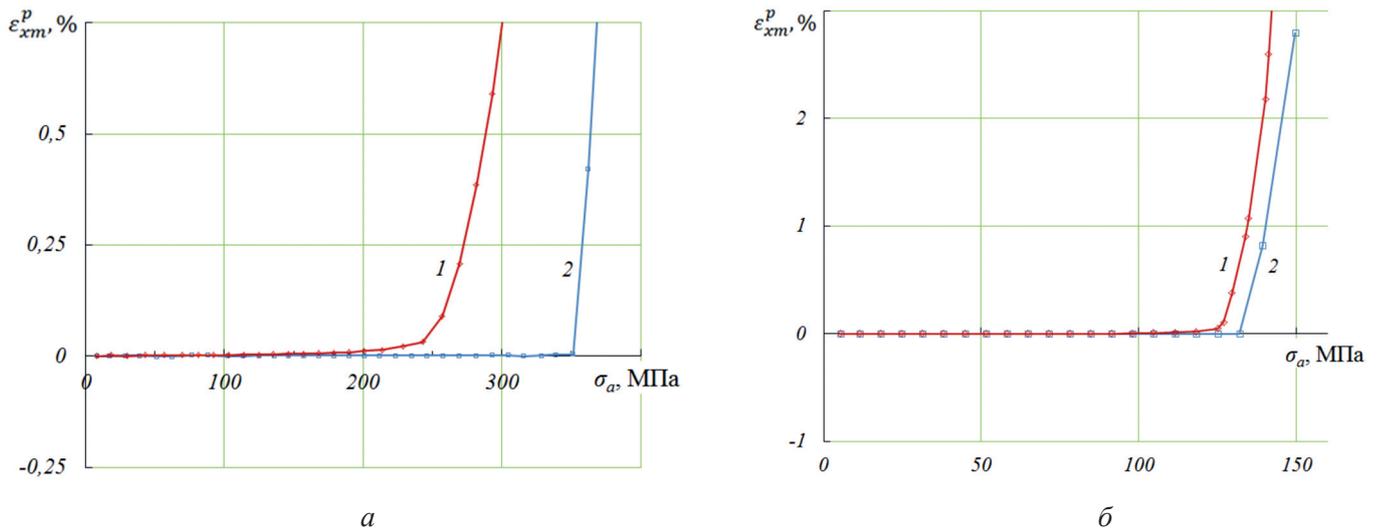


Рис. 8. Изменение средней пластической осевой деформации от амплитуды напряжений образцов:

a – из сплава ВТ6 с отверстием 1 и без него 2; *б* – из сплава Д16 со сварным швом 1 и без шва 2

Fig. 8. Evolution of the plastic mean axial strain as a function of the stress amplitude for samples:

a – made of VT6 (Ti-6Al-4V) alloy with hole 1 and without it 2; *б* – made of alloy D16 (Al-Cu-Mg) with welded seam 1 and without it 2

Данные образцов и сравнение результатов моделирования и эксперимента

Sample data and comparison of simulation and experiment results

Материал / Sample material	Тип образца / Sample type	Размеры / Sample dimensions		Размеры концентратора, мм / Stress concentrator dimensions, mm	Амплитуда напряжений в эксперименте σ_a^{exp} , МПа / Stress Amplitude in the experiment σ_a^{exp} , МПа	Амплитуда напряжений в моделировании σ_a^{num} , МПа / Stress Amplitude in simulation σ_a^{num} , МПа
		<i>h</i> , мм / mm	<i>b</i> , мм / mm			
ВТ6 / (Ti-6Al-4V)	Без отверстия / no hole	2,1	9	–	348	351
	С отверстием / with hole			Ø1,5	245	223
Д16 / (Al-Cu-Mg)	Без шва / no weld	1,5	12	–	130	132
	Со швом / with weld			□1,5	80	118

Выводы

1. Получены экспериментальные зависимости температуры и полных деформаций от величины амплитуды напряжения при однородном и неоднородном НДС в области концентраторов, моделирующих влияние технологических факторов на прочность образцов, изготовленных из титанового (ВТ6) и алюминиевого (Д16) сплавов.

2. Установлено, что:

а) амплитуда критических напряжений образцов из сплава ВТ6 с концентратором напряжений в виде отверстия меньше на 30 % и более, чем у образцов без отверстий;

б) амплитуда критических напряжений образцов из сплава Д16 с концентратором в виде сварного шва напряжений меньше на 38 %, чем у образцов без сварных швов.

3. Проверочные усталостные испытания образцов подтвердили достоверность сделанных ускоренных оценок и выводов, см. п. 2.

4. Результаты моделирования плоских образцов с отверстием и со сварным швом показали удовлетворительное соответствие амплитуд напряжений между данными экспериментов и результатами моделирования. Такое соответствие позволяет проводить качественные численные оценки начала накопления неупругой деформации в конструкциях с концентраторами напряжений при циклическом деформировании с возрастающей амплитудой напряжений. При моделировании использовалась стандартная модель упругопластического тела с упрочнением.

Список литературы

1. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1302 с.
2. Иванова В.С. Структурно-энергетическая теория усталости металлов // Циклическая прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 11–23.
3. Coffin L.F. Low-cycle fatigue: a review // Applied Material Research. – 1962. – Vol. 1, N 3. – P. 129–141.
4. Bathias C. Gigacycle fatigue in mechanical practice. – Vergal: marcel Dekker, 2005. – 304 p. – ISBN 9780203020609. – DOI: 10.1201/9780203020609.
5. Naito T., Ueda H., Kihushi M. Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and non-martensitic microstructure near the surface // Metallurgical Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science. – 1984. – Vol. 15, N 7. – P. 1431–1436.
6. Kanazawa K., Nishijima S. Fatigue fracture of low alloy steel at ultra-high cycle regime under elevated temperature conditions // Journal of the Society of Materials Science. – 1997. – Vol. 46, N 12. – P. 1396–1400. – DOI: 10.2472/jsms.46.1396.
7. Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of superlong fatigue in steels // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1999. – Vol. 22, N 7. – P. 581–590. – DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x.
8. Shiozawa K., Nashino S., Morii Y. Subsurface crack initiation and propagation mechanism of high-strength steels in very high cycle fatigue regime // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol. 28, N 11. – P. 1521–1532. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.08.015.
9. Шаняевский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов: синергетика в авиации. – Уфа: монография, 2007. – 500 с. – ISBN 978-5-94920-058-2.
10. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla prodotta sone ed alle predusioni // Metallurgia Italiana. – 1955. – Vol. 47, N 9. – P. 245–260.
11. Prot E.M. Une nouvelle technique d'essai des materiaux. L'essai de fatigue sous charge progressive // Revue de Metallurgie. – 1948. – Vol. 45, N 12. – P. 481–496.
12. Enomoto N. A method for determining the fatigue limit of metals by means of stepwise load increase tests // Proceedings – American Society for Testing and Materials. – 1959. – Vol. 59. – P. 711–722.
13. Glage A., Weidner A., Biermann H. Effect of austenite stability on the low cycle fatigue behaviour and microstructure of high alloyed metastable austenitic cast TRIP-steels // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2, N 1. – P. 2085–2094. – DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.224.
14. Усталостная прочность аустенитной стали X18H10T после равноканального углового прессования / В.Ф. Терентьев, С.В. Добаткин, Д.В. Просвирнин, И.О. Банных, О.В. Рыбальченко, Г.И. Рааб // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 10. – С. 30–38.
15. Yang Y.S., Bae J.G., Park C.G. Improvement of the bending fatigue resistance of the hyper-eutectoid steel wires used for tire cords by a post-processing annealing // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. A488. – P. 554–561. – DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.048.
16. Структурные особенности поведения высокоуглеродистой перлитной стали при циклическом нагружении / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, В.М. Счастливец, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 111, № 1. – С. 97–111.
17. Щупачев А.М., Пояркова Е.В. Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9, № 6 (24). – С. 152–157.
18. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Радиационная, ультрозвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. – М.: Высшая школа, 1991. – 271 с. – ISBN 5-06-000923-8.
19. Магнитные методы оценки упругой и пластической деформации при циклическом нагружении сталей / Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, С.М. Задворкин // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2015. – Iss. 2. – P. 6–15. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015.
20. Махутов Н.А., Дубов А.А., Денисов А.С. Исследование статических и циклических деформаций с использованием метода магнитной памяти металла // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 3. – С. 42–46.

21. Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения / К.Р. Муратов, В.Ф. Новиков, Д.Ф. Нерадовский, Р.Х. Казаков // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 1. – С. 19–25. – DOI: 10.7868/S0015323018010035.

22. Эффект «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном твердом теле: экспериментальная верификация и механизмы мезоскопического каналирования / В.Е. Панин, А.В. Панин, Т.Ф. Елсукова, О.Ю. Кузина // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 6. – С. 97–105.

23. *Капустин В.И., Гилета В.П., Захарченко К.В.* Экспериментальное изучение закономерностей деформирования алюминиевых сплавов при регулярных нагружениях // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4 (53). – Р. 40–43.

24. *Шаняевский А.А., Банов М.Д., Беклемишев Н.Н.* Диагностика усталости авиационных конструкций акустической эмиссией. – М: Изд-во МАИ, 2017. – 186 с. – ISBN 978-5-4316-0405-8.

25. *Kapustin V.I., Zakharchenko K.V.* On the experimental analysis of dissipative processes under cyclic loading of metals // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012128. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012128.

26. On the effect of plasma electrolytic oxidation on the fatigue strength of V96TS1 (Al-Zn-Mg-Cu) aluminum alloy / K. Zakharchenko, V. Kapustin, M. Legan, A. Larichkin, Y. Lukianov, I. Zverkov // Journal of Physics. Conference Series. – 2020. – Vol. 1666, N 1. – P. 012019. – DOI: 10.1088/1742-6596/1666/1/012019.

27. *Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Shutov A.V.* On the analysis of energy dissipation and ratcheting during cyclic deformation of the titanium alloy VT6 (Ti-6Al-4V) // Journal of Physics. Conference Series. – 2020. – Vol. 1666, N 1. – P. 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012025.

28. Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity / F.A. Diaz, E.A. Patterson, R.A. Tomlinson, J.R. Yates // Fatigue and Fracture of engineering materials and structures. – 2004. – Vol. 27, N 7. – P. 571–583. – DOI: 10.1111/j.1460-2695.2004.00782.x.

29. About the effect of plastic dissipation in heat at the crack tip on the stress intensity factor under cyclic loading / N. Ranc, T. Palin-Luc, P.C. Paris, N. Saintier // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 58. – P. 56–65. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.04.012.

30. *Meneghetti G., Ricotta M.* Evaluating the heat energy dissipated in a small volume surrounding the tip of a fatigue crack // International Journal of Fatigue. – 2016. – Vol. 92, pt. 2. – P. 605–615. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.04.001.

31. *Фридляндер И.Н.* Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 7. – С. 24–29.

32. *Захарченко К.В., Капустин В.И., Ларичкин А.Ю.* О влиянии керамического покрытия на деформационные характеристики алюминиевого сплава Д16АТ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – Р. 37–44.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Enhanced assessment of technological factors for Ti-6Al-4V and Al-Cu-Mg strength properties

Kirill Zakharchenko^{1, 2, a, *}, Vladimir Kapustin^{2, 1, b}, Alexey Larichkin^{1, 3, c}

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2626-6184>,  zaharchenkok@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6124-2503>,  macler06@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7306-9522>,  larichking@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 August 2021

Revised: 16 September 2021

Accepted: 23 September 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Enhanced assessment

Cyclic loading

Elastoplastic strain

Strain characteristics

Dissipative characteristics

Finite element method

Funding

The reported study was funded by RFBR and Novosibirsk region according to the research project № 19-48-543028.

ABSTRACT

Introduction. The strength of construction materials when used under cyclic loads is of great importance in design engineering. A significant number of factors that affect the fatigue resistance have predetermined the creation of numerous methods that consider such influence. Nondestructive methods that are based on the connection of the physical degradation of material with strain properties enable evaluating experimentally the fatigue properties of materials. **Purpose of study:** the analysis of the processes of energy dissipation and strain accumulation during the inelastic cyclic strain of samples, using the *VT6 (Ti-6Al-4V)* titanium alloy and the *D16 (Al-Cu-Mg)* aluminum alloy before and after the technological impact. **The work experimentally investigates** the physical processes of degradation of the *VT6* and *D16* alloy samples that accompany the process of fatigue failure in materials with homogeneous and inhomogeneous stress-strain states in the concentrator (in the form of a hole and a weld). Typical modes are used to reach the fatigue testing that determine the critical stress in a material sample – the stress at which physical properties (temperature, strain) change without reaching the fatigue failure of samples. Critical stress amplitudes in the cycle, based on the data obtained during the experiment and the results of mathematical simulation, are compared. The effect of stress concentrators on critical loads that a detail can withstand after a unit operation is estimated by the finite-element method (*FEM*). **As a result,** the effect of the operational and technological factors on critical stress determined by strain and temperature is estimated. Comparative tests of the *VT6* and *D16* alloy samples with and without stress concentrators showed that the amplitudes of critical stress decrease by more than 30% in comparison with the ones that are without stress concentrators. The low-cycle fatigue tests of the *D16* alloy samples are carried out. Mathematical simulation of the cyclic strain of the samples is carried out using *MSC.Marc* package. The results of the cyclic loading tests, which show that the characteristics of the technological process reduce the amplitudes of the critical stress of the *VT6* and *D16* alloys and affect the fatigue properties of the *D16* aluminum alloy, **are discussed.** Mathematical simulation corresponded positively to the experimental data. Such correspondence indicates the possibility of conducting qualitative numerical assessments of the beginning of the inelastic strain accumulation process in structures with stress concentrators under the cyclic stress and the increasing stress amplitude, using the typical sample made of hardening elastoplastic material.

For citation: Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Larichkin A.Yu. Enhanced assessment of technological factors for Ti-6Al-4V and Al-Cu-Mg strength properties. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 125–139. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-125-139. (In Russian).

References

1. Troshchenko V.T., Sosnovskii L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 1302 p.

* Corresponding author

Zakharchenko Kirill V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (383) 346-17-64, e-mail: zaharchenkok@mail.ru

2. Ivanova V.S. Strukturno-energeticheskaya teoriya ustalosti metallov [Structural-energy theory of fatigue of metals]. *Tsiklicheskaya prochnost' metallov* [Cyclic strength of metals]. Moscow, Academy of Sciences of the Soviet Union Publ., 1962, pp. 11–23.
3. Coffin L.F. Low-cycle fatigue: a review. *Applied Material Research*, 1962, vol. 1, no. 3, pp. 129–141.
4. Bathias C. *Gigacycle fatigue in mechanical practice*. Vergal, Marcel Dekker, 2005. 304 p. ISBN 9780203020609. DOI: 10.1201/9780203020609.
5. Naito T., Ueda H., Kihushi M. Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and non-martensitic microstructure near the surface. *Metallurgical Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 1984, vol. 15, no. 7, pp. 1431–1436.
6. Kanazawa K., Nishijima S. Fatigue fracture of low alloy steel at ultra-high cycle regime under elevated temperature conditions. *Journal of the Society of Materials Science*, 1997, vol. 46, no. 12, pp. 1396–1400. DOI: 10.2472/jsms.46.1396.
7. Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of superlong fatigue in steels. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1999, vol. 22, no. 7, pp. 581–590. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x.
8. Shiozawa K., Nashino S., Morii Y. Subsurface crack initiation and propagation mechanism of high-strength steels in very high cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 2006, vol. 28, no. 11, pp. 1521–1532. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.08.015.
9. Shanyavskii A.A. *Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov: sinergetika v aviatsii* [Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation]. Ufa, Monografiya Publ., 2007. 500 p. ISBN 978-5-94920-058-2.
10. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla prodotta sone ed alle predusioni. *Metallurgia Italiana*, 1955, vol. 47, no. 9, pp. 245–260.
11. Prot E.M. Une nouvelle technique d'essai des materiaux. L'essai de fatigue sous charge progressive. *Revue de Metallurgie*, 1948, vol. 45, no. 12, pp. 481–496.
12. Enomoto N. A method for determining the fatigue limit of metals by means of stepwise load increase tests. *Proceedings – American Society for Testing and Materials*, 1959, vol. 59, pp. 711–722.
13. Glage A., Weidner A., Biermann H. Effect of austenite stability on the low cycle fatigue behaviour and microstructure of high alloyed metastable austenitic cast TRIP-steels. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 2085–2094. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.224.
14. Terent'ev V.F., Dobatkin S.V., Prosvirnin D.V., Bannykh I.O., Rybal'chenko O.V., Raab G.I. Ustalostnaya prochnost' austenitnoi stali Kh18N10T posle ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Fatigue strength of austenitic steel of Kh18N10T grade after equal-channel angular extrusion]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian Metallurgy (Metally)*, 2008, no. 10, pp. 30–38. (In Russian).
15. Yang Y.S., Bae J.G., Park C.G. Improvement of the bending fatigue resistance of the hyper-eutectoid steel wires used for tire cords by a post-processing annealing. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 488, no. 1–2, pp. 554–561. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.048.
16. Makarov A.V., Savrai R.A., Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Egorova L.Y. Structural features of the behavior of a high-carbon pearlitic steel upon cyclic loading. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 95–109. DOI: 10.1134/S0031918X11010091. Translated from *Fizika metallov i metallovedenie*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 97–111.
17. Shchipachev A.M., Poyarkova E.V. Vliyanie ustalostnoi povrezhdaemosti na tverdost' i vnutrennyuyu nakoplenyuyu energiyu metalla [Fatigue deterioration influence on hardness and internal accumulated energy]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2007, vol. 9, no. 6 (24), pp. 152–157.
18. Aleshin N.P., Shcherbinskii V.G. *Radiatsionnaya, ul'trozvukovaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdelii* [Radiation, ultrasonic and magnetic flaw detection of metal products]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 271 p. ISBN 5-06-000923-8.
19. Gorkunov E.S., Savrai R.A., Makarov A.V., Zadvorkin S.M. Magnetic techniques for estimating elastic and plastic strains in steels under cyclic loading. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, iss. 2, pp. 6–15. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.2.006-015. (In Russian).
20. Makhutov N.A., Dubov A.A., Denisov A.S. Issledovanie staticheskikh i tsiklicheskikh deformatsii s ispol'zovaniem metoda magnitnoi pamyati metalla [Study of static and cyclic deformations using the metal magnetic memory method]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2008, vol. 74, no. 3, pp. 42–46. (In Russian).



21. Muratov K.R., Novikov V.F., Neradovskii D.F., Kazakov R.K. Magnetoelastic demagnetization of steel under cyclic loading. *The Physics of Metals and Metallography*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 18–25. DOI: 10.1134/S0031918X1801012X. Translated from *Fizika metallov i metallovedenie*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 19–25. DOI: 10.7868/S0015323018010035.

22. Panin V.E., Panin A.V., Elskova T.F., Kuzina O.Yu. Effekt “shakhmatnoi doski” v raspredelenii napryazhenii i deformatsii na interfeisakh v nagruzhennom tverdom tele: eksperimental’naya verifikatsiya i mekhanizmy mezoskopicheskogo kanalirovaniya [Effect of “chessboard” stress and strain distribution on interfaces in a loaded solid: experimental verification and mesoscopic channeling mechanisms]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2005, vol. 8, no. 6, pp. 97–105. (In Russian).

23. Kapustin V.I., Gileta V.P., Zakharchenko K.V. Eksperimental’noe izuchenie zakonornosti deformirovaniya alyuminievykh splavov pri regulyarnykh nagruzheniyyakh [The experimental study of regularities of aluminum alloys deformation in case of regular stresses]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4 (53), pp. 40–43.

24. Shanyavskii A.A., Banov M.D., Beklemishev N.N. *Diagnostika ustalosti aviatsionnykh konstruksii akusticheskoi emissiei* [Diagnostics of fatigue of aircraft structures by acoustic emission]. Moscow, MAI Publ., 2017. 186 p. ISBN 978-5-4316-0405-8.

25. Kapustin V.I., Zakharchenko K.V. On the experimental analysis of dissipative processes under cyclic loading of metals. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012128. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012128.

26. Zakharchenko K., Kapustin V., Legan M., Larichkin A., Lukianov Y., Zverkov I. On the effect of plasma electrolytic oxidation on the fatigue strength of V96TS1 (Al-Zn-Mg-Cu) aluminum alloy. *Journal of Physics. Conference Series*, 2020, vol. 1666, no. 1, p. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1666/1/012019.

27. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Shutov A.V. On the analysis of energy dissipation and ratcheting during cyclic deformation of the titanium alloy VT6 (Ti-6Al-4V). *Journal of Physics. Conference Series*, 2020, vol. 1666, no. 1, p. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012025.

28. Diaz F.A., Patterson E.A., Tomlinson R.A., Yates J.R. Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2004, vol. 27, no. 7, pp. 571–583. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2004.00782.x.

29. Ranc N., Palin-Luc T., Paris P.C., Saintier N. About the effect of plastic dissipation in heat at the crack tip on the stress intensity factor under cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 2014, vol. 58, pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.04.012.

30. Meneghetti G., Ricotta M. Evaluating the heat energy dissipated in a small volume surrounding the tip of a fatigue crack. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 92, pt. 2, pp. 605–615. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.04.001.

31. Fridlyander I.N. Sovremennye alyuminievye, magnievye splavy i kompozitsionnye materialy na ikh osnove [Modern aluminum, magnesium alloys and composite materials based on them]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2002, no. 7, pp. 24–29. (In Russian).

32. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Larichkin A.Yu. O vliyaniy keramicheskogo pokrytiya na deformatsionnye kharakteristiki alyuminievogo splava D16AT [About the influence of ceramic coatings on the stress-strain characteristics of the alloy D16AT (Al-Cu-Mg)]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 37–44.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Закономерности течения материала по контуру инструмента и стабильность механических свойств материала зоны перемешивания при СТП образцов сплава АМг5 больших толщин

Татьяна Калашникова^{1, 2, a, *}, Владимир Белобородов^{1, b}, Ксения Осипович^{1, c}, Андрей Воронцов^{1, d}, Кирилл Калашников^{1, e}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, 634055, г. Томск, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Российская Федерация

^a <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>, gelombang@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9534-775X>, osipovich_k@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.tsc.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>, kkn@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152.341

История статьи:

Поступила: 16 сентября 2021
 Рецензирование: 28 сентября 2021
 Принята к печати: 05 октября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
 Фрикционная перемешивающая обработка
 Структурно-фазовое состояние
 Механические свойства

Финансирование:

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание производства высокотехнологичного крупногабаритного оборудования интеллектуальной адаптивной сварки трением с перемешиванием для авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 22.11.2019 № 075-11-2019-033), реализуемого НГТУ и ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

АННОТАЦИЯ

Введение. Обработка и сварка трением с перемешиванием являются практически идентичными процессами интенсивной пластической деформации в условиях повышенной температуры. Различаются технологии в основном целью использования: формирование упрочненного поверхностного слоя или получение неразъемного соединения. Однако известно, что как при сварке, так и при обработке трением с перемешиванием заготовок больших толщин возникают температурные градиенты. В результате происходит изменение условий адгезионного взаимодействия, пластического течения материала и формирования зоны перемешивания по сравнению с тонколистовыми заготовками с принципиально отличными показателями отвода тепла. В связи с этим **целью работы** является определение закономерностей организации структуры и стабильности механических свойств в различных направлениях в материале заготовки из алюминий-магниевого сплава толщиной 35 мм, полученном методом сварки/обработки трением с перемешиванием. **Методика исследований.** Описаны техника и режимы сварки, обработки трением с перемешиванием заготовок сплава АМг5 толщиной 35 мм. Приведены данные по используемому для исследований оборудованию для механических испытаний и структурных исследований. **Результаты и обсуждение.** Полученные данные свидетельствуют о превышении механических свойств материала зоны обработки над механическими свойствами материала основного металла во всех направлениях относительно направления обработки. Неоднородности структуры материала после обработки/сварки трением с перемешиванием образцов больших толщин не оказывают определяющего влияния на свойства материала зоны перемешивания. При этом четкой корреляции между значениями прочностных показателей и направлением приложения усилия не выявляется, как не обнаруживается существенного отличия механических свойств от расположения образцов внутри зоны перемешивания. Средние значения предела прочности в вертикальном, поперечном и продольном направлении составляют 302, 295 и 303 МПа, предела текучести – 155, 153 и 152 МПа, относительного удлинения после разрыва 27,2, 27,5, 28,7 % соответственно.

Для цитирования: Закономерности течения материала по контуру инструмента и стабильность механических свойств материала зоны перемешивания при СТП образцов сплава АМг5 больших толщин / Т.А. Калашникова, В.А. Белобородов, К.С. Осипович, А.В. Воронцов, К.Н. Калашников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 140–154. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-140-154.

*Адрес для переписки

Калашникова Татьяна Александровна, научный сотрудник
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (913) 883-69-62, e-mail: gelombang@ispms.ru

Введение

Обработка трением с перемешиванием (ОТП), или фрикционная перемешивающая обработка, и сварка трением с перемешиванием (СТП) являются практически идентичными процессами интенсивной пластической деформации в условиях повышенной температуры [1–3]. Различаются эти технологии в основном целью использования: формирование упрочненного поверхностного слоя или получение неразъемного соединения. При погружении вращающегося инструмента в заготовку и при дальнейшем его продвижении материал разогревается и подвергается пластической деформации, происходит фрагментация зеренной структуры, а затем остывание перенесенного материала и его одновременная рекристаллизация, что приводит к значительным изменениям в структуре материала и его механических свойствах. В основном указанные технологии применяются для сварки или обработки различных алюминиевых сплавов [4–16]. Наиболее применимыми являются алюминий-магниево-скандиевые сплавы AlMg5, AlMg6 [5, 7, 9, 12], сплавы системы Al-Mg-Sc, Al-Mg-Sc-Zr [13, 15], Al-Cu-Li [11], Al-Zn-Mg-Cu [14, 16], Al-Cu-Mg [16] и др. Возможно получение соединений и покрытий на основе разнородных металлов и сплавов системы Al-Cu [17], Cu-Fe [18] и других, а также формирование различных упрочненных композиционных материалов с металлической матрицей [18–20]. Достаточно высокую степень применимости имеет технология фрикционной перемешивающей обработки для упрочнения материалов, полученных методами аддитивных технологий [12, 18]. Обработку трением с перемешиванием можно проводить как по всей толщине заготовки, так и регулировать глубину обрабатываемой области за счет размера инструмента. Сварка трением с перемешиванием возможна как встык, так и внахлест, а также с различной разделкой кромок до сварки. В зависимости от толщины заготовки структура зоны перемешивания значительно отличается: в заготовках больших толщин характерного для СТП- или ОТП-образцов толщиной 2...10 мм монолитного ядра не образуется, что подробно показано на примере СТП-соединения из сплава системы Al-Mg-Sc-Zr толщиной 35 мм в работе [13]. В данном случае ввиду большой толщины

заготовки и возникающих температурных градиентов происходит изменение условий адгезионного взаимодействия, пластического течения материала и формирования зоны перемешивания по сравнению с тонколистовыми заготовками с принципиально отличными показателями отвода тепла. В связи с этим одной из наиболее актуальных задач для исследований является определение закономерности течения материала по контуру инструмента и формирование механических свойств обработанного материала или сварного шва в различных направлениях при проведении обработки или сварки заготовок больших толщин. Целью настоящей работы является получение экспериментальных образцов зоны перемешивания большой толщины и исследования стабильности ее формирования и однородности механических свойств.

Методика исследований

Обработка/сварка трением с перемешиванием (фрикционная перемешивающая обработка) проводилась на установке в ЗАО «Чебоксарское предприятие “Сеспель” на плитах шириной 200 мм листового проката сплава AlMg5 толщиной 35 мм. Обработку/сварку проводили по схеме, представленной на рис. 1. Заготовку 1 обрабатывали инструментом 2 путем внедрения пина 3 при вращении 4 инструмента с последующим перемещением вдоль линии стыка 5. Такая технология была использована не для создания соединения, а с целью определения граничных значений параметров процесса интеллектуальной адаптивной сварки трением с перемешиванием для плит сплава AlMg5 толщиной 35 мм. Скорость вращения инструмента (ω) составляла 250 об/мин, скорость продольного перемещения инструмента (v) была 250 мм/мин, сила прижатия инструмента к заготовке (P) – 3600 кг, угол наклона инструмента составлял 3,0 град. Параметры процесса подбирались опытным путем. Длина соединения обрабатываемой области составляла 250 мм. Образцы для механических испытаний вырезали на участке шва 6. Образцы из зоны обработки 7 вырезали в вертикальном направлении 8, поперечном направлении 9 и продольном направлении 10 в количестве восьми образцов для каждого направления. Размер исследуемой области не соответствует Межго-

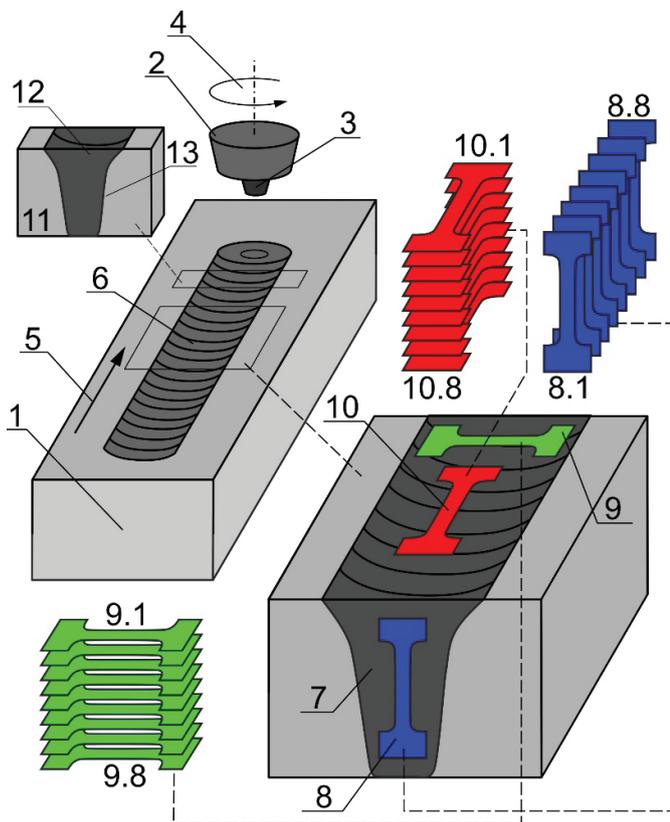


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием и вырезки образцов для механических испытаний и поперечных шлифов:

1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – пин инструмента; 4 – направление вращения инструмента; 5 – направление обработки/сварки трением с перемешиванием; 6 – область вырезки образцов для механических испытаний; 7 – зона обработки; 8 – вырезка лопаток в вертикальном направлении; 9 – вырезка лопаток в поперечном направлении; 10 – вырезка лопаток в продольном направлении; 11 – вырезка поперечных шлифов; 12 – зона перемешивания; 13 – зоны термомеханического и термического влияния

Fig. 1. Scheme of the friction stir welding process and cutting out samples for mechanical tests and metallography:

1 – workpiece; 2 – tool; 3 – tool pin; 4 – direction of tool rotation; 5 – direction of friction stir processing/welding; 6 – cutting area of the specimens for mechanical tests; 7 – processing zone; 8 – cutting of the blade-shaped test specimens in the vertical direction; 9 – cutting of the blade-shaped test specimens in transverse direction; 10 – cutting of the blade-shaped test specimens in longitudinal direction; 11 – metallographic sections; 12 – stir zone; 13 – thermomechanically and heat affected zones

сударственным стандартам, поэтому вырезались образцы в уменьшенном виде с сохранением стандартных пропорций. Размер лопаток составлял 2,7×2,2×12 мм. Для исследования структуры материала в поперечном сечении вырезали шлиф 11. В данном случае на шлифе четко выделяется зона

перемешивания 12 и околошовные зоны термического и термомеханического влияния 13.

Образцы для исследования изменения структуры по толщине в горизонтальной плоскости вырезались из заготовки после обработки трением с перемешиванием на электроискровом станке в планарном сечении, после чего делились на две части (рис. 2) для изучения зоны, где инструмент входит в заготовку (образцы 1.1–1.5), и зоны с отверстием от выхода инструмента (образцы 2.1–2.5). Изменение микроструктуры металла исследовалось на полированных и травленных шлифах с использованием металлографического микроскопа АЛЬТАМИ МЕТ 1С. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС 110М-100. Микротвердость измерялась на микротвердометре Duramin 5.

Результаты и их обсуждение

При фрикционной перемешивающей обработке, как и при сварке трением с перемешиванием (СТП), в зоне перемешивания по всей толщине заготовки на глубину погружения инструмента образуется сложная структура, представляющая собой результат формирования потоков материала по контуру инструмента в процессе сварки/обработки (рис. 3). В зоне перемешивания алюминиевого сплава АМг5 толщиной 35 мм, характерного для сварки образцов толщиной 2...10 мм, монолитного ядра в данном случае не обнаружено, однако формируется несколько ядер в виде завихрений слоев под плечами инструмента и в корне зоны перемешивания (см. рис. 3). Аналогичная закономерность наблюдалась при анализе структуры сплава Al-Mg-Sc-Zr в работе [13]. Однако за счет более качественно подобранных параметров процесса на этапе предварительных исследований в данной работе удалось избежать крупных несплошностей в верхней части образца. Режимы подобраны таким образом, что в обрабатываемой зоне не образуются дефекты, которые часто встречаются при сварке заготовок больших толщин. Пунктирными линиями выделены характерные структурные зоны, образующиеся в СТП-соединениях: зона перемешивания 1, зона термомеханического воздействия 2, зона термического влияния 3 и основной металл 4. Зона термомеханического

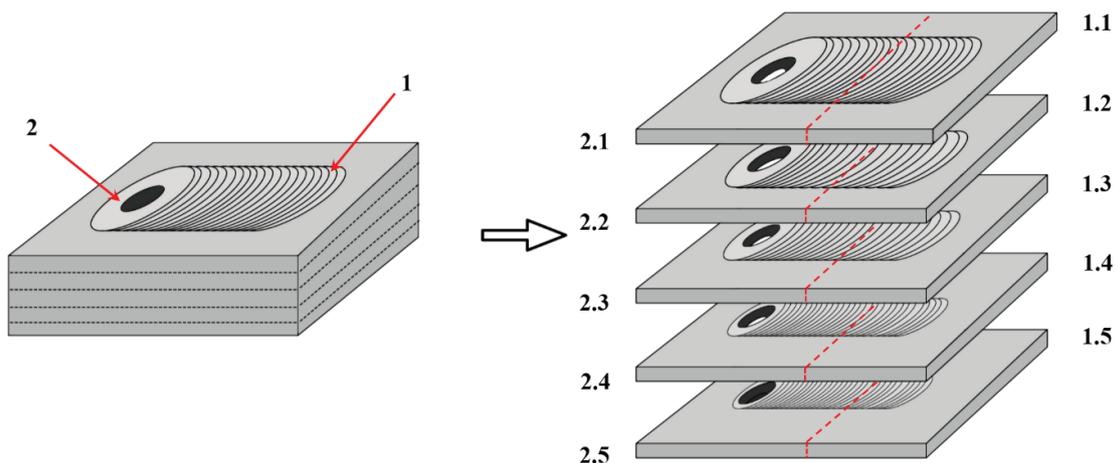


Рис. 2. Схема вырезки образцов в горизонтальном сечении для исследования пластического течения материала в зоне перемешивания по толщине обрабатываемого материала:
1 – зона входа инструмента; 2 – отверстие от выхода инструмента

Fig. 2. Scheme of cutting out samples in horizontal section to study the material plastic flow in the stir zone through the thickness of the processed material:

1 – tool inlet zone; 2 – tool outlet zone

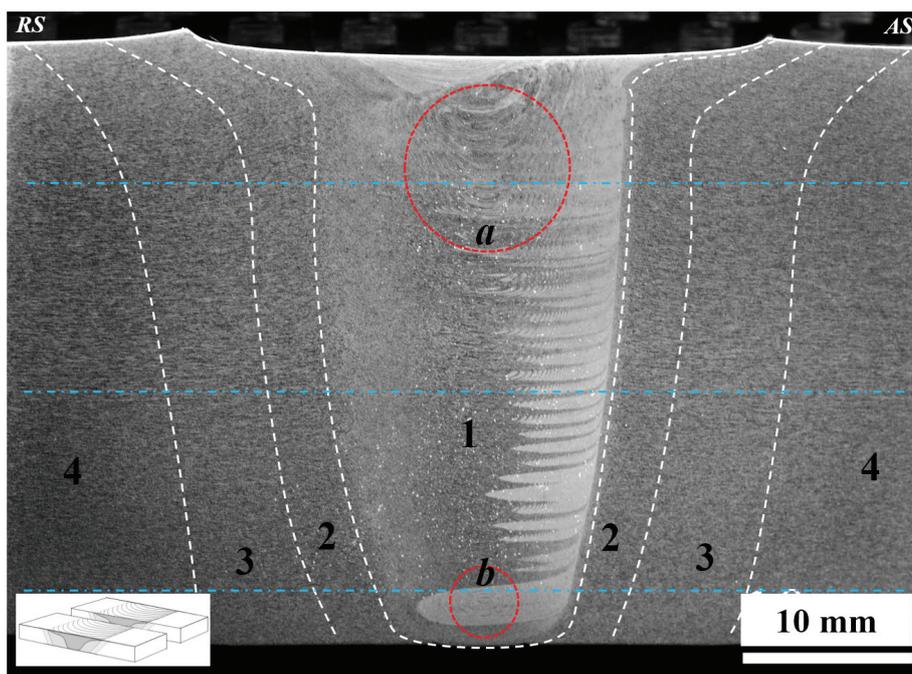


Рис. 3. Макроструктура образца, вырезанного в поперечном сечении, после фрикционной перемешивающей обработки:

1 – зона перемешивания; 2 – зона термомеханического воздействия; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл; *a* – формирование ядра в зоне под плечами инструмента; *b* – формирование ядра в корне обработанной заготовки; RS – отступающая сторона; AS – наступающая сторона. Линии, вдоль которых проводилось измерение микротвердости, обозначены пунктиром

Fig. 3. Macrostructure of a sample cut in cross section after friction stir processing:

1 – stir zone; 2 – thermomechanically affected zone; 3 – heat affected zone; 4 – base metal; *a* – nugget formation in the near-shoulder area; *b* – nugget formation in the weld root; RS – retreating side; AS – advancing side. Lines along which the microhardness measurement was carried out are indicated with dashed lines

влияния с наступающей стороны AS имеет резкую границу с зоной перемешивания, с отступающей стороны RS имеется плавный переход от зоны термомеханического влияния к зоне шва.

Макроструктура образцов в горизонтальном сечении представлена на рис. 4 и 5. В структуре образцов в верхней части зоны перемешивания

можно выделить существенную неоднородность строения 4 (рис. 4, а). Такое положение может быть связано с влиянием на структуру в верхней части образца пластической деформации от плеч инструмента при обработке. В зоне начала движения на всех участках по толщине соединения формируется неоднородность структуры 1 (рис. 4 и 5).

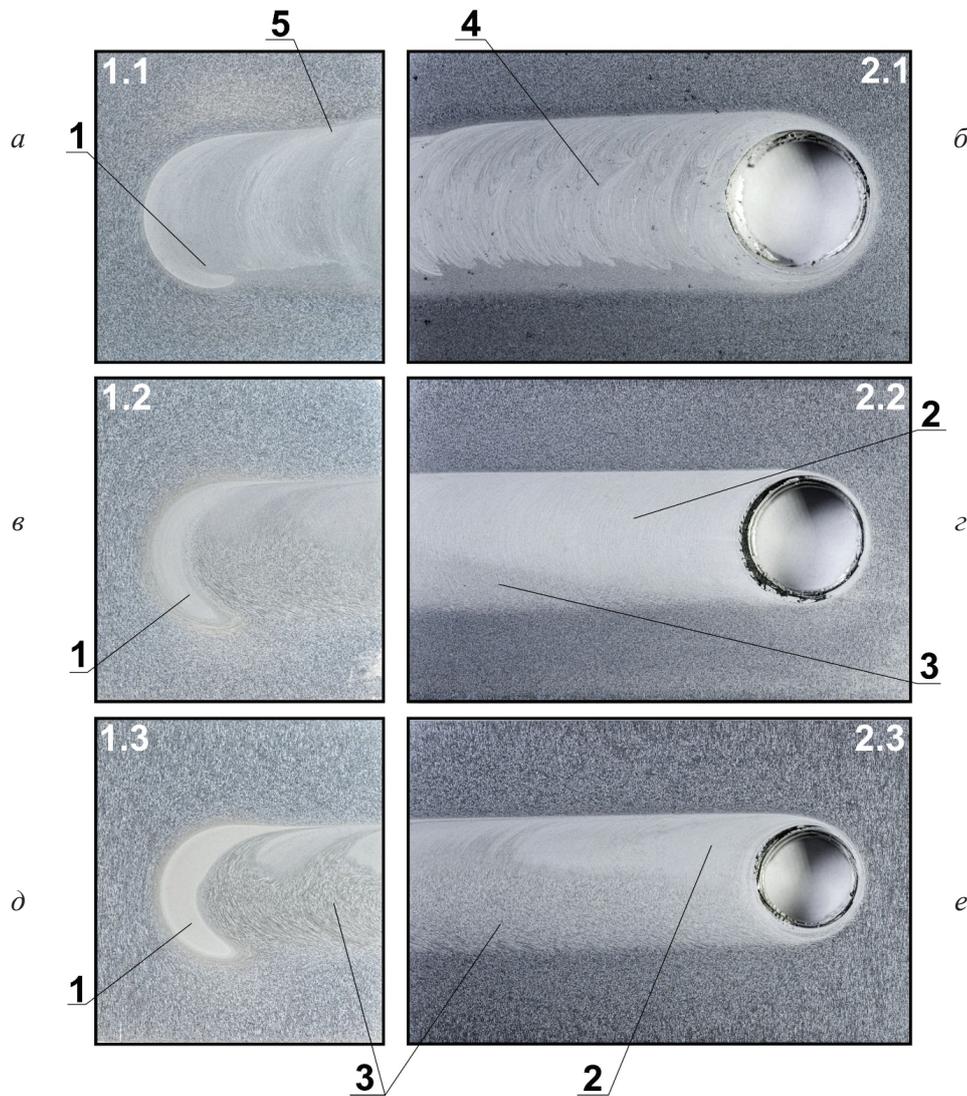


Рис. 4. Макроструктура образцов 1.1 – 1.3 (а, в, д) и 2.1 – 2.3 (б, з, е), вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1: 1 – неоднородности строения материала в зоне входа инструмента; 2 – зона с преимущественно протравленной структурой со слоистым строением зоны перемешивания; 3 – зона с преимущественно протравленными зёрнами в зоне перемешивания; 4 – неоднородности строения зоны перемешивания в подплечевой зоне; 5 – изменение ширины зоны обработки в начале перемещения инструмента

Fig. 4. Macrostructure of samples 1.1 – 1.3 (a, v, d) and 2.1 – 2.3 (b, z, e) cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1:

1 – inhomogeneities of material structure in the tool inlet zone; 2 – area with a predominantly etched structure with a layered structure of the stir zone; 3 – area with predominantly etched grains in the stir zone; 4 – inhomogeneities of the stir zone structure in the near-shoulder area; 5 – change in the width of the processing zone at the beginning of the tool movement

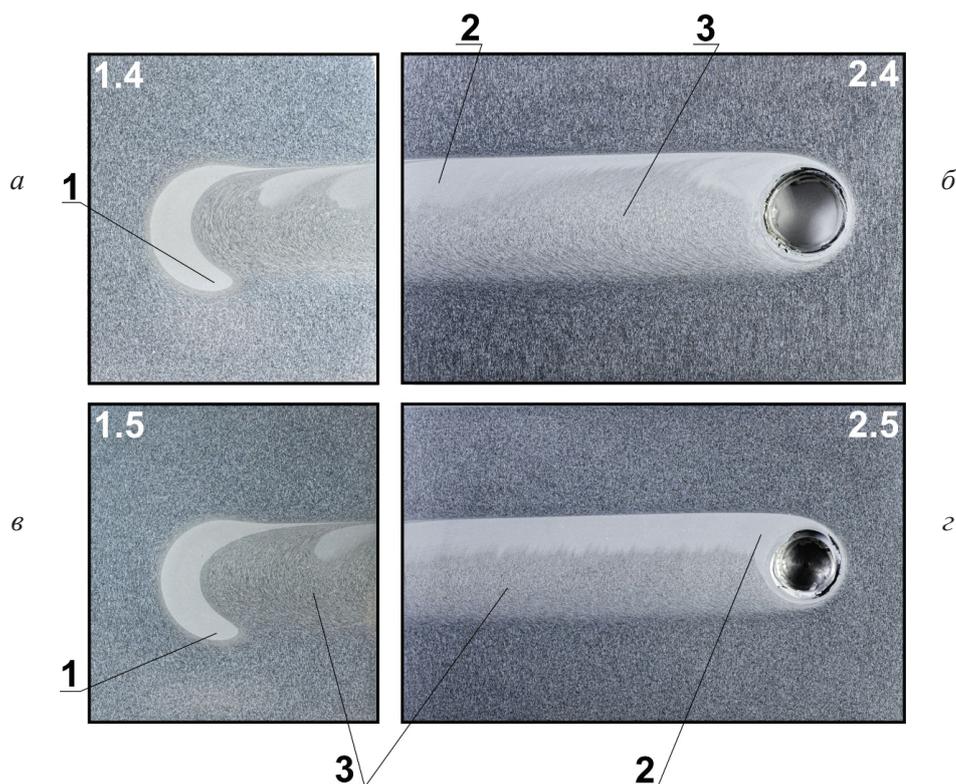


Рис. 5. Макроструктура образцов 1.4–1.5 (а, в) и 2.4–2.5 (б, з), вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1:

1 – неоднородности строения материала в зоне входа инструмента; 2 – зона с преимущественно протравленной структурой со слоистым строением зоны перемешивания; 3 – зона с преимущественно протравленными зёрнами в зоне перемешивания

Fig. 5. Macrostructure of samples 1.4–1.5 (a, в) and 2.4–2.5 (б, з) cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1:

1 – inhomogeneities of material structure in the tool inlet zone; 2 – area with a predominantly etched layered structure of the stir zone; 3 – area with predominantly etched grains in the stir zone

Это связано с достаточно сложными условиями вначале движения инструмента за счет неустановившегося теплового режима. Далее по длине шва можно выделить утолщение зоны перемешивания 5 (рис. 4), в которой инструмент после прогрева материала полностью прижимается плечами к заготовке и формирует зону перемешивания той ширины, которой она является на этапе установившегося режима сварки/обработки.

В более нижних слоях структура металла на этапе установившегося режима формируется с большей стабильностью по длине шва (рис. 4, б, в). В структуре образцов горизонтального сечения после травления четко выделяются два типа структуры, которые содержат элементы с различным характером травления. В первом из них 2 (рис. 4 и 5) четко выделяются слои переносимого металла, расстояние между которыми

коррелирует со значением подачи на один оборот инструмента. Во второй области структура демонстрирует склонность к травлению на зерно 3 (рис. 4, 5) и не проявляет слоистой структуры зоны перемешивания.

В нижней части зоны перемешивания (рис. 5, а, б) структура металла представлена достаточно стабильным строением. Кроме того, присутствуют зоны, в которых травление выявляет слои в зоне перемешивания 2 (рис. 5) и зерна 3 (рис. 5). Следует отметить, что распределение данных зон по толщине образцов достаточно неоднородно и изменяется от одного образца к другому неравномерно. В целом в нижних слоях образца структура зоны перемешивания более однородна, чем в верхних слоях. Такое положение может объяснить большее давление от прижатия сварочного инструмента в нижней зоне перемешивания, чем в верхней.

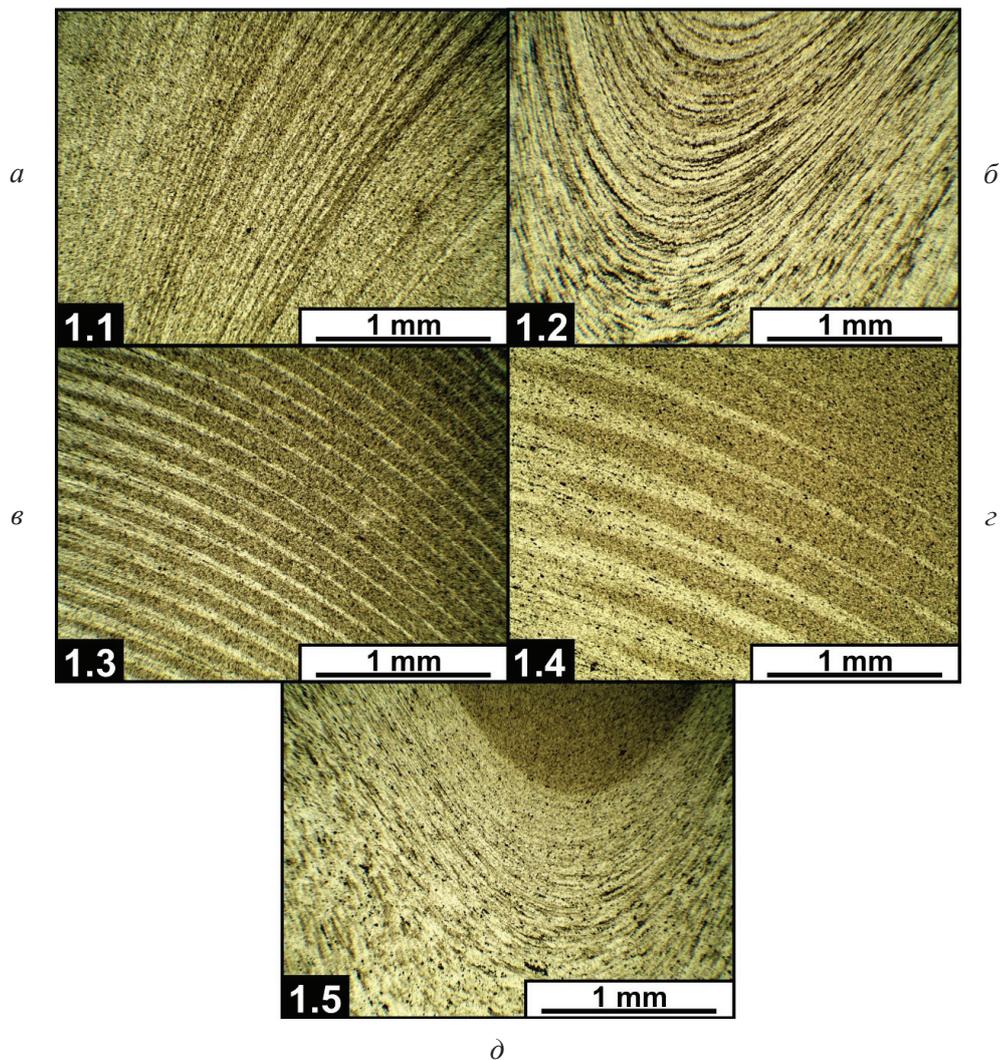


Рис. 6. Структура образцов 1.1–1.5 (а–д) в зоне входа инструмента, вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 6. Structure of samples 1.1–1.5 (a–d) in the tool inlet zone, cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1

Отчасти это может подтвердить механика процесса сварки/обработки.

Структура в зоне входа инструмента имеет аналогичное строение на всех участках по толщине образца (рис. 6). Как видно из рис. 6, а–г, структура представлена смесью протравленных слоев и протравленных зерен. Неоднородности структуры проявляются четко в виде сложных форм в организации зоны перемешивания (рис. 6, б, д). Размер слоев близок к величине подачи на оборот при движении инструмента. Причина, по которой в одних участках травление проявляет слои, а в других зерна, до конца не ясна. Можно предположить, что на границе потоков металла, формирующих соединение, травимость границ зерен меньше,

чем травимость слоев переноса, а внутри потоков травимость границ зерен выше. В структуре образцов не выявлено образования дефектов сварных швов, характерных для сварки трением с перемешиванием, что может свидетельствовать о потенциально высоких механических свойствах материала в различных направлениях.

В зоне выхода инструмента (рис. 7, 8) структура металла, наоборот, существенно зависит от расстояния от плеч инструмента. В верхней части образца (вблизи плеч) можно подробно увидеть строение неоднородностей, описанных ранее при анализе макроструктуры (рис. 7, а). Различные по глубине параметры в структуре можно выделить в форме и раз-

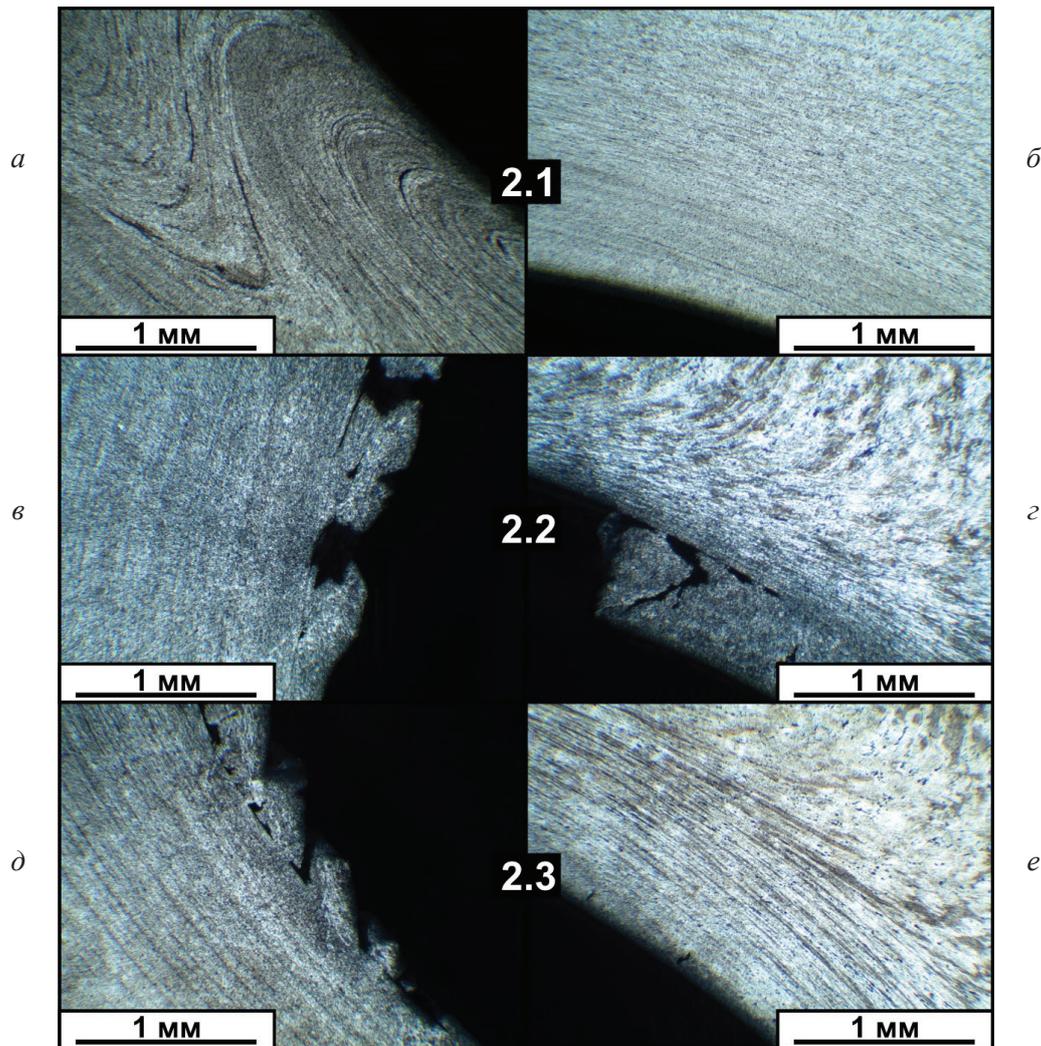


Рис. 7. Структура образцов 2.1 (а, б), 2.2 (в, г) и 2.3 (д, е) в зоне выхода инструмента, вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 7. Structure of samples 2.1 (а, б), 2.2 (в, г) and 2.3 (д, е) in the tool outlet zone, cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1

мерах слоя переноса, а также в особенностях его состояния в зоне выхода инструмента (рис. 7, в–е и 8, а–г). Наименьшая толщина слоя переноса, как и зоны перемешивания ожидаемо находится в нижней части зоны обработки, где диаметр пина инструмента минимален (рис. 8, в, г). Кроме того, встречаются частично оторванные от зоны перемешивания слои переноса практически на каждом уровне по высоте образца (рис. 7, в–д и 8, а). Отрыв части зоны перемешивания при выходе инструмента обусловлен адгезией алюминиевого сплава к стальному инструменту, а также тем фактом, что достаточно большая часть материала при обработке находится между витками нарезки винтового пина.

Определение микротвердости материала шва и околошовной зоны неразъемных со-

единений показывает, что в материале основных для СТП-соединения структурных зон из сплава АМг5 толщиной 35 мм не происходит разупрочнения материала по сравнению с твердостью основного металла соответствующего сплава (рис. 9). Данные, полученные в ходе измерений микротвердости основных структурных зон по Виккерсу, также показывают отсутствие существенного упрочнения материала и небольшие различия в значениях твердости на разных по толщине участках соединения. При этом разброс значений микротвердости в целом по образцу достаточно существенный (от 745 до 1045 МПа, т. е. 40 % от минимальной величины), что значительно выше, чем увеличение микротвердости в центральной части

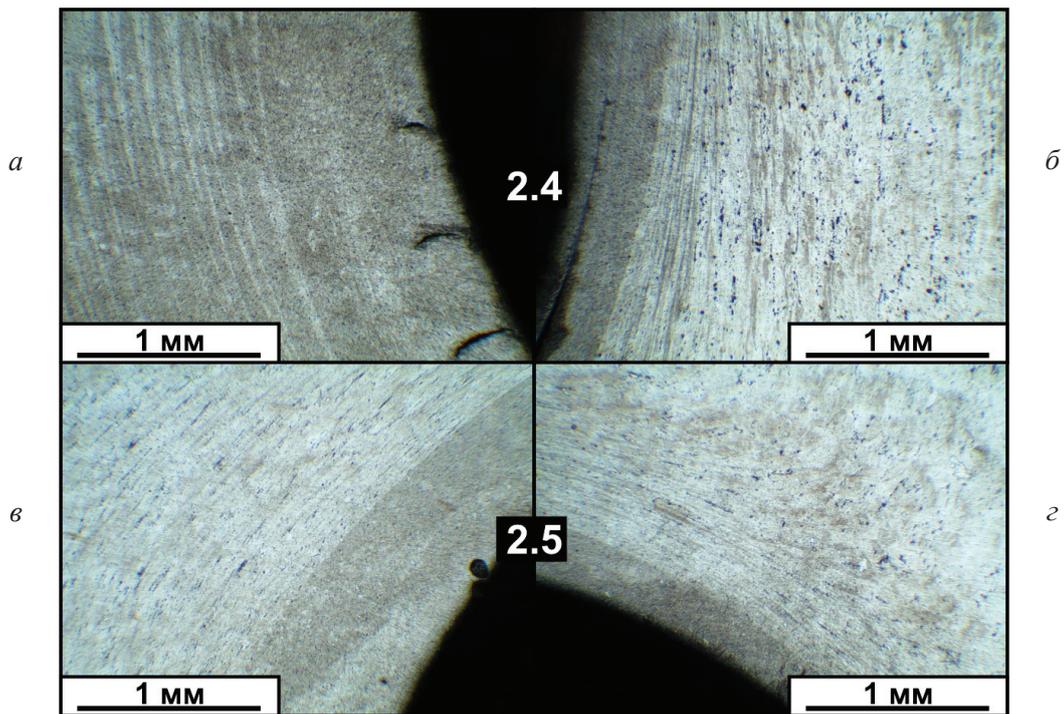


Рис. 8. Структура образцов 2.4 (а, б) и 2.5 (в, г) в зоне выхода инструмента, вырезанных в горизонтальном сечении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 8. Structure of samples 2.4 (a, б) and 2.5 (в, г) in the tool outlet zone, cut in the horizontal section according to the scheme shown in Fig. 1

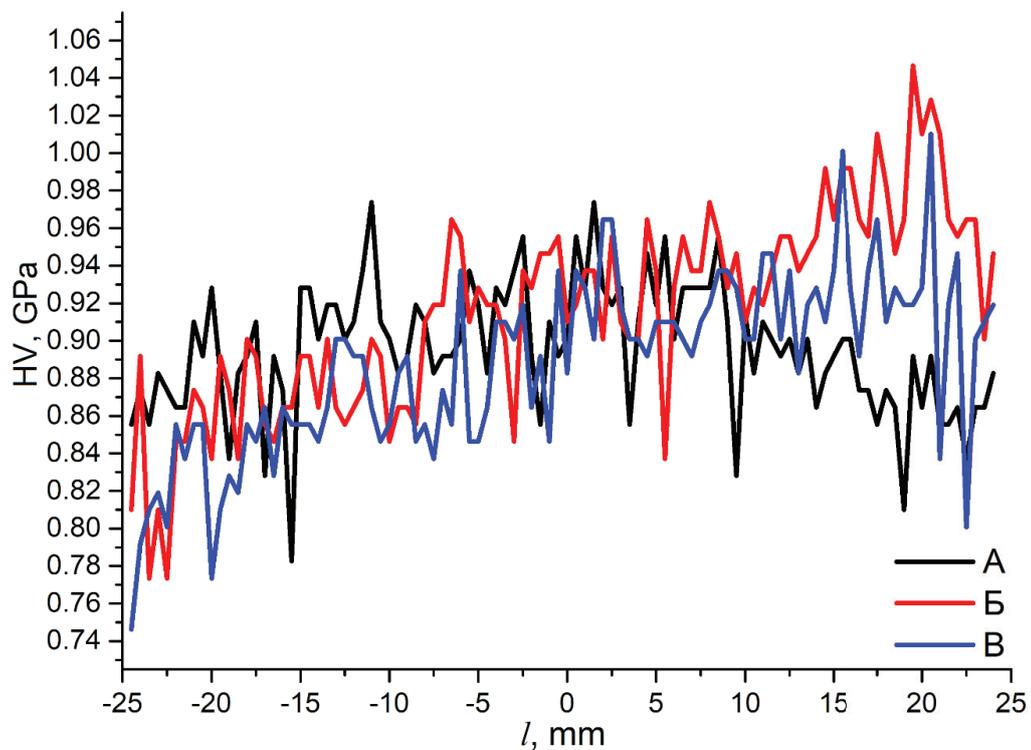


Рис. 9. Изменение микротвердости в зоне перемешивания и околошовной зоне образцов в соответствии со схемой, изображенной на рис. 2

Fig. 9. Change of microhardness measured according to the scheme shown in Fig. 2 in the stir zone and near-weld zone

зоны перемешивания (от 745 до 975 МПа, или 31 % от минимального значения) относительно микротвердости основного металла.

Механические испытания образцов, вырезанных в различных направлениях из зоны перемешивания (см. рис. 1), говорят о типичном деформационном поведении для алюминий-магниевого сплава с присущим ему эффектом прерывистой пластичности (рис. 10). Испытания основного металла плит сплава АМг5 толщиной 35 мм показывают средние значения временного сопротивления 301 МПа. Механические испытания показали, что для исследуемых образцов характерны достаточно высокие механические свойства в вертикальном (рис. 10, а), поперечном (рис. 10, б) и продольном (рис. 10, в) направлении в сравнении с характеристиками основного металла. Средние значения временного сопротивления в вертикальном, поперечном и продольном направлении составляют 302, 295 и 303 МПа, предела

текучести – 155, 153 и 152 МПа, относительного удлинения после разрыва – 27,2, 27,5 и 28,7 % соответственно. Помимо достаточно близких значений предела прочности, текучести и относительного удлинения после разрыва для образцов также можно отметить высокую стабильность деформационного поведения при растяжении, о чем свидетельствует наложение графиков друг на друга.

Оценка стабильности временного сопротивления для разных направлений приложения усилия (рис. 11) позволяет уточнить, что в целом в поперечном направлении прочностные свойства несколько ниже на всех участках измерения, но во всех направлениях прочность материала шва выше прочности материала исходного листового проката. В центральной части соединения также имеется некоторая тенденция к снижению механической прочности по сравнению со значениями в верхней и нижней части листа.

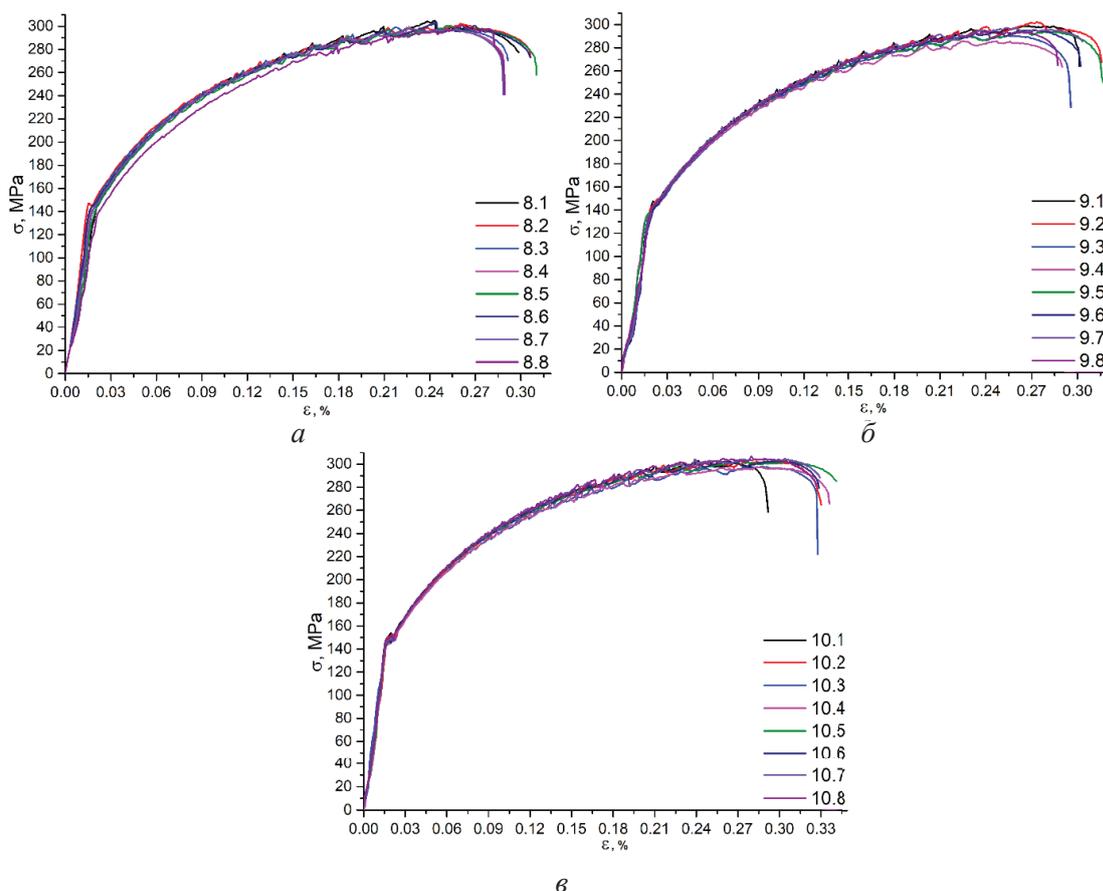


Рис. 10. Диаграммы испытаний образцов, вырезанных в вертикальном (а), поперечном (б) и продольном (в) направлении по схеме, представленной на рис. 1

Fig. 10. Test diagrams for specimens cut in vertical (a), transverse (b) and longitudinal (v) directions according to the scheme shown in Fig. 1

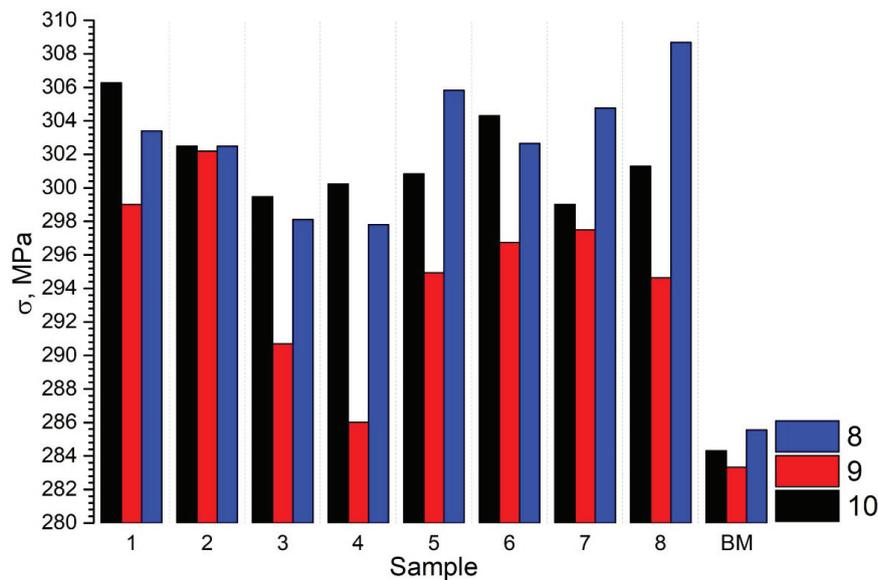


Рис. 11. Сопоставление временного сопротивления образцов, вырезанных из различных участков зоны перемешивания со свойствами основного металла

Fig. 11. Comparison of the ultimate tensile strength of test samples cut from different areas of the stir zone with the base metal one

Заклучение

Проведенные исследования показывают, что несмотря на наличие неоднородностей структуры образцов, полученных путем обработки трением с перемешиванием толстолистовых заготовок толщиной 35 мм, механические свойства материала зоны обработки превышают свойства материала основного металла во всех направлениях относительно линии обработки. Неоднородности структуры материала после обработки/сварки трением с перемешиванием образцов больших толщин не оказывают определяющего влияния на свойства материала зоны перемешивания. Четкой корреляции между значениями прочностных показателей и направлением приложения усилия не выявляется, как не обнаруживается и существенного отличия механических свойств от расположения образцов внутри зоны перемешивания. Средние значения предела прочности в вертикальном, поперечном и продольном направлении составляют 302, 295 и 303 МПа, предела текучести – 155, 153 и 152 МПа, относительного удлинения после разрыва – 27,2, 27,5 и 28,7 % соответственно. Деформационное поведение образцов при испытаниях имеет схожий характер, и для каждой группы образцов можно выделить лишь небольшие от-

личия в процессе пластической деформации и разрушения. Значения микротвердости также достаточно близки и не проявляют тенденции к увеличению или уменьшению в зоне перемешивания на величину более 31 %, в то время как разброс значений микротвердости в целом по образцу составляет порядка 40 %. Полученные данные дают возможность сделать вывод о высокой степени применимости технологий сварки и обработки трением с перемешиванием для получения неразъемных соединений и упрочненных поверхностных структур заготовок из алюминиево-магниевого сплава АМг5, в том числе больших толщин.

Список литературы

1. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2005. – Vol. 50, iss. 1. – P. 1–78. – DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
2. Friction stir welding of aluminium alloys / P.L. Threadgill, A.J. Leonard, H.R. Shercliff, P.J. Withers // International Materials Reviews. – 2009. – Vol. 54, iss. 2. – P. 49–93. – DOI: 10.1179/174328009X411136.
3. Balasubramanian V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 480, iss. 1–2. – P. 397–403. – DOI: 10.1016/j.msea.2007.07.048.



4. Effects of Sc and Zr on mechanical property and microstructure of tungsten inert gas and friction stir welded aerospace high strength Al-Zn-Mg alloys / Y. Deng, B. Peng, G. Xu, Q. Pan, Z. Yin, R. Ye, Y. Wang, L. Lu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 639. – P. 500–513. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.05.052.

5. Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy / M.S. Han, S.J. Lee, J.C. Park, S.C. Ko, Y.B. Woo, S.J. Kim // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2009. – Vol. 19. – P. 17–22. – DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60238-5.

6. *Miranda A.C.O., Gerlich A., Walbridge S.* Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – Vol. 147. – P. 243–260. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.007.

7. *Chennaiah M.B., Kumar K.R., Sridhar V.* Influence of tool profiles on similar Al-5083 alloys using friction stir welding // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 46. – P. 8032–8037. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.787.

8. *Sabari S.S., Malarvizhi S., Balasubramanian V.* Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 22. – P. 278–289. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.03.014.

9. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique / M. Koilraj, V. Sundareswaran, S. Vijayan, S.R. Koteswara Rao // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 42. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.02.016.

10. Fracture behaviour of friction stir welded dissimilar aluminium alloys / N.Z. Khan, A. Maqbool, T. Ahmad, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 46. – P. 6688–6691. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.158.

11. Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding / A. Naumov, F. Isupov, E. Rylkov, P. Polyakov, M. Panteleev, A. Skupov, S.T. Amancio-Filho, O. Panchenko // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9, iss. 6. – P. 14454–14466. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.008.

12. Structural heredity of the aluminum alloy obtained by the additive method and modified under severe thermomechanical action on its final structure

and properties / T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, V.E. Rubtsov, K.N. Kalashnikov, E.A. Kolubaev, A.A. Eliseev // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 62, iss. 9. – P. 1565–1572. – DOI: 10.1007/s11182-020-01877-z.

13. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets / T. Kalashnikova, A. Chumaevskii, K. Kalashnikov, S. Fortuna, E. Kolubaev, S. Tarasov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – P. 1–20. – DOI: 10.3390/met10060806.

14. Severe friction stir processing of an Al-Zn-Mg-Cu alloy: Misorientation and its influence on superplasticity / A. Orozco-Caballero, O.A. Ruano, E.F. Rauch, F. Carreño // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 137. – P. 128–139. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.008.

15. Multifractal analyses of serrated flow in friction stir processed Al-Mg-Sc alloy / J. Xie, X.P. Chen, L. Mei, P. Ren, G.J. Huang, Q. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 786. – P. 139436. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139436.

16. *Anil Kumar K.S., Murigendrappa S.M., Kumar H.* A bottom-up optimization approach for friction stir welding parameters of dissimilar AA2024-T351 and AA7075-T651 alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – Vol. 26, iss. 7. – P. 3347–3367. – DOI: 10.1007/s11665-017-2746-z.

17. Microstructure of in-situ friction stir processed Al-Cu transition zone / A. Zykova, A. Chumaevskii, A. Gusarova, T. Kalashnikova, S. Fortuna, N. Savchenko, E. Kolubaev, S. Tarasov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – P. 818. – DOI: 10.3390/met10060818.

18. Regularities of structural changes after friction stir processing in materials obtained by the additive method / A.V. Gusarova, A.V. Chumaevskii, K.S. Osipovich, K.N. Kalashnikov, T.A. Kalashnikova // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. – 2020. – Vol. 11, iss. 3. – P. 195–205. – DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033694.

19. A review of friction stir processing of structural metallic materials: process, properties, and methods / A.P. Zykova, S. Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, E.A. Kolubaev // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 6. – P. 772. – DOI: 10.3390/met10060772.

20. The mechanical properties of different alloys in friction stir processing: a review / A. Chaudhary, A. Kumar Dev, A. Goel, R. Butola, M.S. Ranganath // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 2. – P. 5553–5562. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.146.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Stir zone material flow patterns during friction stir welding of heavy gauge AA5056 workpieces and stability of its mechanical properties

Tatiana Kalashnikova^{1, 2, a, *}, Vladimir Beloborodov^{1, b}, Kseniya Osipovich^{1, c}, Andrey Vorontsov^{1, d}, Kirill Kalashnikov^{1, e}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>, gelombang@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-9534-775X>, osipovich_k@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.tsc.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>, kkn@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 September 2021

Revised: 28 September 2021

Accepted: 05 October 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Friction stir welding
Friction stir processing
Structural-phase state
Mechanical properties

Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project “Establishment of production of high-tech large-sized equipment for intelligent adaptive friction stir welding for the aerospace and transport industries of the Russian Federation” (Agreement No. 075-11-2019-033 dated November 22, 2019) implemented by the NSTU and ISPMS SB RAS at the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

ABSTRACT

Introduction. Friction stir welding and processing are almost identical processes of severe plastic deformation at elevated temperatures. These technologies differ mainly in the purpose of its use: the formation of a hardened surface layer or producing a welded joint. However, it is known that both during welding and during processing of heavy gauge workpieces temperature gradients occur. As a result, the conditions of adhesive interaction, material plastic flow, and the formation of the stir zone change as compared to thin-sheet workpieces with fundamentally different heat dissipation rates. In this connection, **the purpose of the work** is to determine the regularities of the structure formation and stability of the mechanical properties in different directions in the material of 35-mm-thick aluminum-magnesium alloy samples produced by friction stir welding/processing. **Research Methodology.** The technique and modes of friction stir welding and processing of AA5056 alloy workpieces with a thickness of 35 mm are described. Data on the equipment used for mechanical tests and structural research are given. **Results and discussion.** The data obtained show the excess mechanical properties of the processing zone material over the base metal ones in all studied directions. Material structure heterogeneities after friction stir welding/processing of heavy gauge workpieces have no determining effect on the stir zone properties. At the same time, there is no clear correlation between the tensile strength values and the load application direction, nor is there any significant difference in mechanical properties depending on the location of the samples inside the stir zone. The average ultimate tensile strength values in the vertical, transverse, and longitudinal directions are 302, 295 and 303 MPa, respectively, with the yield strength values of 155, 153 and 152 MPa, and the relative elongation of 27.2, 27.5, 28.7 %.

For citation: Kalashnikova T.A., Beloborodov V.A., Osipovich K.S., Vorontsov A.V., Kalashnikov K.N. Stir zone material flow patterns during friction stir welding of heavy gauge AA5056 workpieces and stability of its mechanical properties. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 140–154. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-140-154. (In Russian).

* Corresponding author

Kalashnikova Tatiana A., Research Officer
Institute of Strength Physics and Materials Science
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
2/4, pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: 8 (382) 228-68-63, e-mail: gelombang@ispms.ru

References

1. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, vol. 50, iss. 1, pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
2. Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 2009, vol. 54, iss. 2, pp. 49–93. DOI: 10.1179/174328009X411136.
3. Balasubramanian V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 480, iss. 1–2, pp. 397–403. DOI: 10.1016/j.msea.2007.07.048.
4. Deng Y., Peng B., Xu G., Pan Q., Yin Z., Ye R., Wang Y., Lu L. Effects of Sc and Zr on mechanical property and microstructure of tungsten inert gas and friction stir welded aerospace high strength Al-Zn-Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 639, pp. 500–513. DOI: 10.1016/j.msea.2015.05.052.
5. Han M.S., Lee S.J., Park J.C., Ko S.C., Woo Y.B., Kim S.J. Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19, pp. 17–22. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60238-5.
6. Miranda A.C.O., Gerlich A., Walbridge S. Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, vol. 147, pp. 243–260. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.007.
7. Chennaiah M.B., Kumar K.R., Sridhar V. Influence of tool profiles on similar Al-5083 alloys using friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 8032–8037. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.787.
8. Sabari S.S., Malarvizhi S, Balasubramanian V. Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, vol. 22, pp. 278–289. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.03.014.
9. Koilraj M., Sundareswaran V., Vijayan S., Koteswara Rao S.R. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique. *Materials and Design*, 2012, vol. 42, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.02.016.
10. Khan N.Z., Maqbool A., Ahmad T., Siddiquee A.N., Khan Z.A. Fracture behaviour of friction stir welded dissimilar aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 46, pp. 6688–6691. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.158.
11. Naumov A., Isupov F., Rylkov E., Polyakov P., Panteleev M., Skupov A., Amancio-Filho S.T., Panchenko O. Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, iss. 6, pp. 14454–14466. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.008.
12. Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Rubtsov V.E., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Eliseev A.A. Structural heredity of the aluminum alloy obtained by the additive method and modified under severe thermomechanical action on its final structure and properties. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 62, iss. 9, pp. 1565–1572. DOI: 10.1007/s11182-020-01877-z.
13. Kalashnikova T., Chumaevskii A., Kalashnikov K., Fortuna S., Kolubaev E., Tarasov S. Microstructural analysis of friction stir butt welded Al-Mg-Sc-Zr alloy heavy gauge sheets. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, pp. 1–20. DOI: 10.3390/met10060806.
14. Orozco-Caballero A., Ruano O.A., Rauch E.F., Carreño F. Severe friction stir processing of an Al-Zn-Mg-Cu alloy: Misorientation and its influence on superplasticity. *Materials and Design*, 2018, vol. 137, pp. 128–139. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.008.
15. Xie J., Chen X.P., Mei L., Ren P., Huang G.J., Liu Q. Multifractal analyses of serrated flow in friction stir processed Al–Mg–Sc alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 786, p. 139436. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139436.
16. Anil Kumar K.S., Murigendrappa S.M., Kumar H. A bottom-up optimization approach for friction stir welding parameters of dissimilar AA2024-T351 and AA7075-T651 alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, vol. 26, iss. 7, pp. 3347–3367. DOI: 10.1007/s11665-017-2746-z.
17. Zykova A., Chumaevskii A., Gusarova A., Kalashnikova T., Fortuna S., Savchenko N., Kolubaev E., Tarasov S. Microstructure of in-situ friction stir processed Al-Cu transition zone. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, p. 818. DOI: 10.3390/met10060818.
18. Gusarova A.V., Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Kalashnikov K.N., Kalashnikova T.A. Regularities of structural changes after friction stir processing in materials obtained by the additive method. *Nanoscience*

and Technology: An International Journal, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 195–205. DOI: 10.1615/NanoSciTechno-IntJ.2020033694.

19. Zykova A.P., Tarasov S.Yu., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A review of friction stir processing of structural metallic materials: process, properties, and methods. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 6, p. 772. DOI: 10.3390/met10060772.

20. Chaudhary A., Kumar Dev A., Goel A., Butola R., Ranganath M.S. The mechanical properties of different alloys in friction stir processing: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 2, pp. 5553–5562. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.146.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Синтез карбида и диборида титана для металлообработки и получения керамики

Юрий Крутский^{1, а, *}, Евгений Максимовский^{2, б}, Роман Петров^{3, с}, Ольга Нецкина^{3, 4, д},
Арина Ухина^{5, е}, Татьяна Крутская^{6, ф}, Татьяна Гудыма^{7, г}

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

² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, пр. академика Лаврентьева, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, пр. академика Лаврентьева, 5, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁵ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, ул. Кутателадзе, 18, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁶ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Ленинградская, 113, г. Новосибирск, 630008, Россия

⁷ Новосибирский химико-технологический колледж им. Д.И. Менделеева, ул. Садовая, 26, г. Новосибирск, 630102, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0003-2524-4143>,  krutskii@yandex.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-1555-2719>,  eugene@niic.nsc.ru,

^с  <https://orcid.org/0000-0002-2335-7032>,  petrov@catalysis.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0002-2323-7372>,  netskina@catalysis.ru,

^е  <https://orcid.org/0000-0003-1878-0538>,  auhina181@gmail.com, ^ф  <https://orcid.org/0000-0001-8003-4523>,  t.krutskaya@mail.ru,

^г  <https://orcid.org/0000-0002-4724-3371>,  gudymatan@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 661.882

История статьи:

Поступила: 26 августа 2021

Рецензирование: 24 сентября 2021

Принята к печати: 16 октября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Карбид титана

Диборид титана

Безвольфрамовые твердые сплавы

Карбидостали

Керамика

Финансирование:

Работа выполнена в соответствии с госзаказом Минобрнауки (код FSUN 2020-0008).

Благодарности:

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Карбид и диборид титана характеризуются высокими значениями твердости, химической инертностью и по этой причине широко используются в современной технике. В статье приведены сведения о синтезе карбида и диборида титана карботермическим и карбидоборным методами соответственно, об использовании карбида титана в качестве абразива и при изготовлении безвольфрамовых твердых сплавов, карбидосталей, износостойких покрытий, а также диборида титана при получении режущего инструмента и применении его в качестве модифицирующей добавки при изготовлении керамики из карбида бора. **Целью работы** является исследование процессов синтеза высокодисперсных порошков карбида и диборида титана, перспективных для изготовления режущего инструмента, износостойких покрытий, абразивов и керамики. **Методы исследования.** Реагентами при синтезе карбида и диборида титана служили оксид титана TiO₂, нановолокнистый углерод (НВУ) и высокодисперсный карбид бора. Эксперименты по получению карбида титана проводились в печи сопротивления, а диборида титана – в индукционной печи. Рентгеновские исследования фазового состава образцов карбида и диборида титана проводились на дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Electron SA). Определение содержания титана и примесей в образцах карбида и диборида титана выполнялось рентгеноспектральным флуоресцентным методом на анализаторе ARL–Advant'x. Содержание общего углерода в образцах карбида титана определялось на приборе C-144 фирмы LECO. Определение содержания бора и прочих элементов для образцов диборида титана выполнялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС–ИСП) на спектрометре IRIS Advantage (Thermo Jarrell Ash Corporation). Морфология поверхности и размеры частиц образцов изучались на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss Sigma. Определение распределения размеров частиц/агрегатов выполнялось на лазерном анализаторе MicroSizer 201 (ВА Инструментс). **Результаты.** В статье предложены технологические процессы получения высокодисперсных порошков карбида и диборида титана. Оптимальная температура синтеза карбида титана 2000...2100 °С, а диборида титана 1600...1700 °С. Содержание основного вещества находится на уровне 97,5...98,0 масс.%. **Обсуждение.** Предложен возможный механизм образования карбида и диборида титана, заключающийся в переносе паров оксидов титана на поверхность твердого углерода (синтез карбида титана) и паров бора и оксидов титана на поверхность твердого углерода (синтез диборида титана). Из-за высоких значений чистоты и дисперсности полученные порошки карбида и диборида титана могут быть использованы для изготовления режущего инструмента и керамики. По этой же причине полученный порошок карбида титана может быть использован в качестве абразивного материала для изготовления безвольфрамовых твердых сплавов, карбидосталей, износостойких покрытий, а порошок диборида титана – для приготовления режущего инструмента и керамики на основе карбида бора.

Для цитирования: Синтез карбида и диборида титана для металлообработки и получения керамики / Ю.Л. Крутский, Е.А. Максимовский, Р.В. Петров, О.В. Нецкина, А.В. Ухина, Т.М. Крутская, Т.С. Гудыма // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 155–166. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-155-166.

*Адрес для переписки

Крутский Юрий Леонидович, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +7-953-882-18-92, e-mail: krutskii@yandex.ru

Введение

Карбид и диборид титана относятся к бескислородным тугоплавким соединениям. Они характеризуются высокой твердостью и химической инертностью. Наиболее перспективным методом получения карбида титана является карботермическое восстановление [1], а диборида титана – карбидоборное восстановление [2, 3].

Поскольку вольфрам дефицитен и очень дорог, карбид титана используется в так называемых безвольфрамовых твердых сплавах (БВТС). Отечественной промышленностью освоен выпуск твердых сплавов на основе карбида титана марки ТН20. Разработанный сплав по твердости соответствует, а по прочности приближается к вольфрамсодержащим маркам групп ВК и ТК и обладает высокой износостойкостью, пониженной склонностью к схватыванию с обрабатываемыми материалами, устойчив к окислению на воздухе при высоких температурах и к воздействию агрессивных сред. Это позволяет рекомендовать его к применению вместо ряда традиционных марок твердых сплавов [4]:

– в области обработки металлов резанием при точении и фрезеровании малоуглеродистых, инструментальных и быстрорежущих сталей, цветных металлов и некоторых марок чугунов в условиях, где применяются стандартные сплавы Т30К4, Т15К6, Т14К8, ВК6 и ВК8;

– для изготовления измерительного инструмента, различных износостойких деталей и технологической оснастки (распылительные сопла, клапаны буровых насосов, матрицы пресс-форм и вытяжных штампов и т. д.) взамен стандартных сплавов типа ВК;

– для армирования некоторых видов бурового инструмента.

В публикации [5] сообщалось о получении керамики из карбида титана горячим прессованием смеси порошков титана и графита с добавлением никеля при температуре 1200 °С и давлении 40 МПа в течение 30 минут. Относительная плотность ее достигала 98 %. Такая керамика, по мнению авторов, может быть использована в качестве режущего инструмента. В работе [6] керамический композиционный материал TiB_2-TiC , предназначенный для использования в качестве режущего инструмента, получен горячим прессованием смеси порошков диборида и кар-

бида титана в вакууме при температуре 1650 °С и давлении 40 МПа. При массовом отношении $TiB_2 : TiC = 75 : 25$ полученная керамика имела прочность на изгиб 920 МПа и микротвердость 22,6 ГПа. Значение трещиностойкости составило 7,6 МПа·м^{0,5}. В публикации [7] керамический композиционный материал $TiB_2-TiC+Al_2O_3$, также предназначенный для использования в качестве режущего инструмента, получен смешиванием порошков TiB_2 , TiC и Al_2O_3 с последующим горячим прессованием в вакууме при температуре 1650 °С и давлении 30 МПа. Полученные образцы имели прочность на изгиб 1100±62 МПа и твердость 21,53±0,36 ГПа. Значение трещиностойкости составило 8,5 ± 0,8 МПа·м^{0,5}. Помимо вышесказанного возможно использование карбида титана в износостойких покрытиях, характеризующихся высокими значениями микротвердости [8, 9].

Абразивная обработка является одной из важнейших операций в машиностроении и для ее выполнения в некоторых отраслях промышленности отводится до 60 % станочного парка. Между тем традиционные абразивы (корунд, карбида кремния и бора) полностью не удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к этим материалам [10]. Перспективным абразивным материалом является карбид титана. Сочетание высокой твердости и некоторой пластичности наряду с химической инертностью по отношению к металлам группы железа, являющимся основой большинства шлифуемых конструкционных материалов, обуславливает высокую эффективность его использования для абразивной обработки. В статье [11] разработана технология получения карбида титана методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Порошок карбида титана, полученный таким способом, имеет следующий химический состав, масс. %: $C_{связ}$ 19,3...19,7; $C_{своб}$ и O не более 0,3; N – следы; сумма примесей, определяемая спектральным анализом, не более 0,25. При испытаниях на абразивную способность установлено, что по этому показателю порошок карбида титана, полученный методом СВС, превосходит порошок, полученный карботермическим восстановлением оксида титана. Следовательно, он является высококачественным, технологичным и экономичным инструментальным материалом. Наибольший технико-экономический

эффект приносит его использование в качестве компонента абразивных паст для шлифования и полирования.

Карбидосталами называют материалы, состоящие из сталей и карбидов с их массовым содержанием от 20 до 70 %. В качестве карбидов обычно используют соединения титана и вольфрама. По свойствам и назначению они занимают промежуточное положение между быстрорежущими сталями и твердыми сплавами. Карбидостали сочетают в себе свойства обеих составляющих: тугоплавкой твердой основы и стальной матрицы. Тугоплавкая составляющая обеспечивает сплаву твердость, прочность и износостойкость, а сталь – вязкость и пластичность. Карбидостали получают методами порошковой металлургии [12]. Карбид титана применяется для изготовления карбидосталей: Р6М5Ф3–20% TiC (жидкофазное спекание); Р6М5К5–КТ20, 6Х6В3МФС–КТ20 (горячее изостатическое прессование); 6М5К5–КТ20 (горячая экструзия); Р5М5К5–20% TiC (горячее штампование). Твердость этих карбидосталей составляет 86...90 HRA, прочность на изгиб 1300...2000 МПа [13].

Карбид бора характеризуется уникальной комбинацией низкой плотности (2,52 г/см³), высокой твердости (до 40 ГПа для горячепрессованных изделий) и химической инертности в сочетании с высокой температурой плавления (2450 °С), вследствие чего керамика из этого соединения нашла применение в ряде областей современной техники [14]. Однако получение плотной керамики из этого соединения является трудной задачей из-за низкого значения коэффициента самодиффузии (он является следствием сильной ковалентной связи между атомами бора и углерода), низкой пластической деформации этого соединения и высокого сопротивления скольжению между его зернами [15]. Перспективным направлением улучшения эксплуатационных характеристик керамики на основе карбида бора является использование модифицирующих добавок. Их присутствие активирует процесс спекания за счет снижения энергии активации, что приводит к уменьшению размеров зерен, увеличению плотности, прочности и трещиностойкости спеченных композиций. Для этой цели можно использовать диборид

ды переходных металлов, в частности диборид титана [16–19].

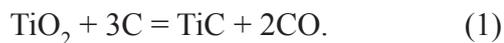
Цель данной работы – исследование процессов синтеза высокодисперсных порошков карбида и диборида титана, перспективных для изготовления режущего инструмента, износостойких покрытий, абразивов и керамики.

Методика исследований

Реагентами при синтезе карбида и диборида титана служили оксид титана TiO₂ ОСЧ 7-3ТУ 6-09-3811-79 (содержание основного вещества 99 масс.%), нановолокнистый углерод – НВУ (величина удельной поверхности 150 м²/г, содержание основного вещества 99 масс.% [20]) и высокодисперсный карбид бора (средний размер частиц 2,1 мкм, содержание основного вещества 98,5 масс.% [21]). Эксперименты по получению карбида титана карботермическим методом проводились в печи сопротивления с графитовым нагревателем, а диборида титана – в индукционной печи тигельного типа ВЧ–25АВ. Рентгеновские исследования фазового состава образцов карбида и диборида титана проводились на дифрактометре *ARL X'TRA* (*Thermo Electron SA*) с использованием CuKα излучения (длина волны $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Диапазон углов 2θ обычно составлял от 20° до 70°. Определение содержания титана и примесей в образцах карбида и диборида титана выполнялось рентгеноспектральным флуоресцентным методом на анализаторе *ARL-Advant'x* с Rh-анодом рентгеновской трубки. Погрешность измерений – 1 %. Содержание общего углерода в образцах карбида титана определялось на приборе *C-144* фирмы *LECO*. Погрешность измерений – 1 %. Определение содержания бора и прочих элементов для образцов диборида титана выполнялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС–ИСП) на спектрометре *IRIS Advantage* (*Thermo Jarrell Ash Corporation*). Погрешность измерений – 1 %. Морфология поверхности и размеры частиц образцов изучались на растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss Sigma* (*Carl Zeiss*). Определение распределения размеров частиц/агрегатов выполнялось на лазерном анализаторе *MicroSizer 201* (ВА Инструментс). Погрешность измерений <5%.

Результаты и их обсуждение

Шихта для получения карбида титана готовилась по стехиометрии для реакции:



Эксперименты по синтезу карбида титана проводились при следующих температурах: 1600, 1800, 2000 и 2100 °С (образцы 1-1, 1-2, 1-3 и 1-4 соответственно). Дифрактограммы образцов представлены на рис. 1.

При температурах термообработки 1600 и 1800 °С в образцах наряду с карбидом титана присутствует реагент – оксид титана. При более высоких температурах (2000 и 2100 °С) процесс карбидообразования завершается, о чем свидетельствует наличие в образцах только одной фазы (TiC). В табл. 1 приведены результаты рентгеноспектрального флуоресцентного анализа однофазных образцов. Содержание элементов с атомной массой больше, чем у фтора (Al, Ni, Cu, Si, Ca, Fe, Nb, Cr, Zr), в примесях незначительно. Как видно из табл. 1, образцы достаточно

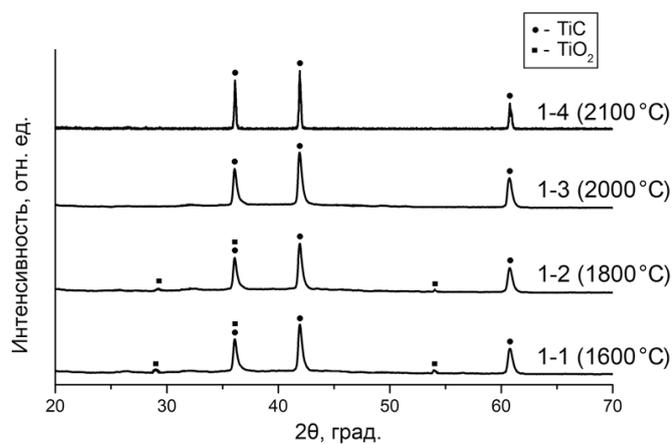


Рис. 1. Дифрактограммы образцов карбида титана

Fig. 1. Diffraction patterns of titanium carbide samples

схожи между собой по содержанию титана и общего углерода. Расчетное содержание в карбиде титана состава TiC: титана – 80,00 масс.%; углерода – 20,00 масс.%.

Расчетное содержание примесей в карбиде титана с учетом содержания 1 масс.% примесей в оксиде титана и НВУ составляет 1,92 масс.%. Приведенные в табл. 1 данные очень близки к расчетным, что является (наряду с незначительным содержанием примесей) доказательством высокой чистоты полученных продуктов. С учетом возможного содержания непрореагировавших диоксида титана и углерода содержание примесей в полученном карбиде титана можно оценить примерно в 2 масс.%. По совокупности результатов рентгенофазового и элементного анализа можно утверждать, что в данном случае процесс карбидообразования практически полностью завершается при температурах 2000 °С и выше. Таким образом, оптимальные условия синтеза карбида титана с использованием в качестве восстановителя и карбидизатора НВУ следующие: массовое соотношение TiO_2/C по стехиометрии на карбид TiC, проведение процесса в слабо восстановительной газовой среде (смесь $\text{N}_2 + \text{CO}$) при температуре 2000...2100 °С.

На рис. 2 представлены снимки РЭМ-образцов, полученных при взаимодействии диоксида титана с углеродом при разных температурах. Образцы 1-3 и 1-4 практически состоят из однородных частиц.

Это является косвенным свидетельством завершения процесса карбидообразования. Можно также отметить, что частицы карбида титана преимущественно агрегированы, а края их ровные (форма не осколочная), что характерно для соединений, полученных по химическим реакциям.

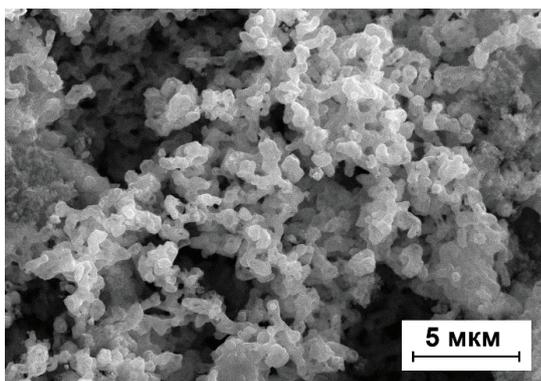
Таблица 1

Table 1

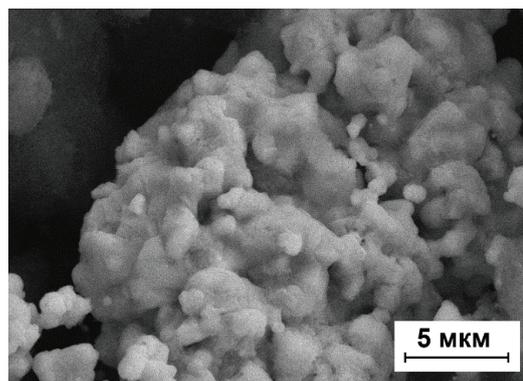
Результаты рентгеноспектрального флуоресцентного анализа образцов 1-3 и 1-4

Results of X-ray fluorescence analysis of samples 1-3 and 1-4

Образец / Sample	Содержание, масс.% / Content, wt. %		
	Ti	$C_{\text{общ}} / C_{\text{total}}$	Примеси / Residual elements
1-3	79,49	19,6	1,69
1-4	79,42	19,8	1,71



a



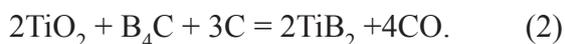
б

Рис. 2. Снимки РЭМ образцов 1-3 (а) и 1-4 (б)

Fig. 2. SEM images of samples 1-3 (a) and 1-4 (б)

По результатам седиментационного анализа образца 1-4, выполненного геометрическим методом моментов [22], средний размер частиц/агрегатов составляет 9,6 мкм, а стандартное отклонение 2,50 мкм. При величине стандартного отклонения в диапазоне от 2,0 до 4,0 мкм частицы/агрегаты «плохо отсортированы» или полидисперсны.

Шихта для получения диборида титана готовилась по следующей стехиометрии для химической реакции:



Эксперименты по синтезу диборида титана проводились при температурах 1600 и 1700 °С (образцы 2-1, 2-2, 2-3 и 2-4 соответственно). Дифрактограммы образцов показаны на рис. 3. При температурах термообработки 1600 и 1700 °С полученные образцы содержат только фазу TiB_2 независимо от времени процесса. Наличие другого возможного продукта реакции – моноборида TiB не обнаружено.

В табл. 2 приведены результаты рентгеноспектрального флуоресцентного анализа образцов 2-1 и 2-2.

Содержание элементов с атомной массой больше, чем у фтора (Al, Ni, S, Si, Nb, Zr), в примесях незначительно. Определение содержания бора и прочих элементов выполнялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП). Результаты анализа приведены в табл. 3.

Расчетное содержание титана в дибориде титана составляет 68,57 масс.%, а бора – 31,43 масс.%. Обращает на себя внимание тот факт, что полученные по основным элементам (Ti и B) данные двух принципиально различных методов анализа сопоставимы и близки к расчетным. Можно также утверждать, что увеличение продолжительности термообработки шихты от 20 до 30 мин практически не влияет на фазовый и элементный состав продуктов синтеза. С учетом наличия в дибориде титана примесей реагентов содержание основного вещества в нем можно

зависимости от температуры термообработки. Результаты анализа приведены в табл. 3.

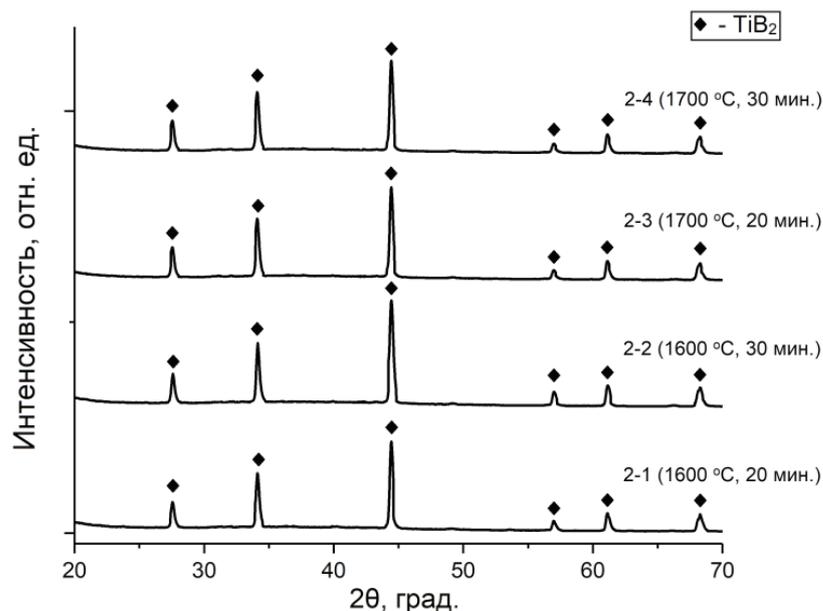


Рис. 3. Дифрактограммы образцов диборида титана

Fig. 3. Diffraction patterns of titanium diboride samples

Таблица 2

Table 2

Результаты анализа образцов 2-1 и 2-2, определенные рентгеноспектральным флуоресцентным методом

Results of samples 2-1 and 2-2 determined by X-ray fluorescence analysis

Образец / Sample	Содержание, масс.% / Content, wt. %		
	Ti	Примеси / Residual elements	≤ F*
2-1	68,28	0,57	1,15
2-2	68,36	0,48	1,16

* Суммарное содержание элементов с атомной массой меньше, чем у фтора включительно / The total content of elements with atomic mass less than that of fluorine inclusive.

Таблица 3

Table 3

Результаты анализа образцов диборида титана, определенные методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой

Results of analysis of titanium diboride samples determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry

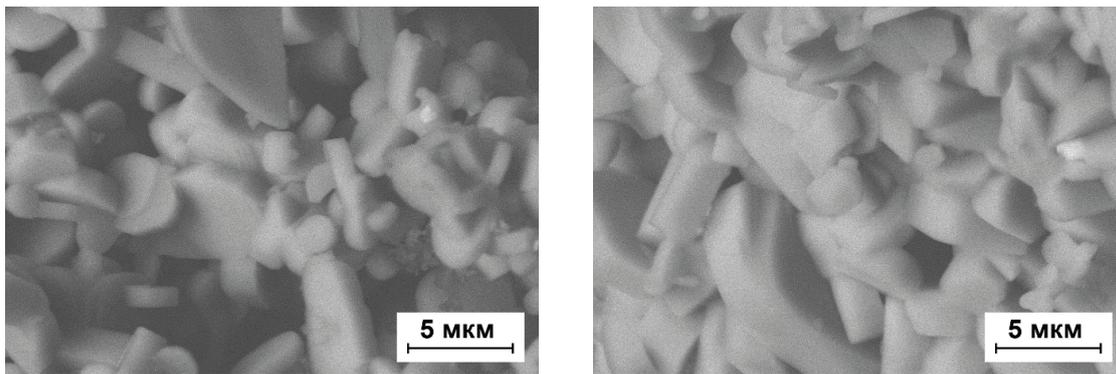
Образец / Sample	Содержание, масс.% / Content, wt. %		
	Ti	$B_{\text{общ}} / B_{\text{total}}$	Примеси / Residual elements
2-1	67,33	31,42	0,91
2-2	67,36	31,22	0,86

оценить в 97,5 масс.%. Оптимальными в данном случае условиями синтеза являются: массовое соотношение реагентов по стехиометрии на диборид титана и температура 1600...1700 °С. На рис. 4 представлены снимки РЭМ-образцов, полученных при взаимодействии диоксида титана с углеродом и карбидом бора при температуре 1700 °С и времени синтеза 20 и 30 мин.

Образцы 2-3 и 2-4 практически состоят из однородных частиц. Это является косвенным свидетельством завершения процесса карбидообразования. Частицы имеют столбчатую форму с ровными краями. Они преимущественно агрегированы. Результаты седиментационного анализа образцов диборида титана, выполненные по методике, приведенной в [22], представлены в табл. 4.

Как следует из полученных результатов, с увеличением температуры термообработки от 1600 до 1700 °С размеры агрегированных частиц закономерно возрастают. Все порошкообразные образцы полидисперсны.

При анализе процессов карбидо- и боридообразования следует исходить из того, что при температурах синтеза давление паров углерода существенно ниже давления паров оксидов металлов и бора. Так, давление паров углерода при температурах: 1630, 1730, 1930 и 2130 °С составляет: $3 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-5}$; $2,6 \cdot 10^{-3}$ и $8,5 \cdot 10^{-2}$ Па соответственно [23]. Давление пара над оксидом титана при температуре 2030 °С (почти соответствует оптимальной температуре синтеза карбида титана) равно 1 Па, а при температуре 1730 °С (почти соответствует оптимальной температуре синтеза диборида титана) составляет 0,01 Па. Пар над этим оксидом содержит ионы Ti^+ и TiO^+ , молекулы TiO и TiO_2 , атомы Ti [24]. Известно [25], что давление паров бора над системой карбид борууглерод при температуре 1730 °С (примерно соответствует оптимальной температуре синтеза диборида титана) равно 0,1 Па, а давление других газообразных компонентов на два порядка (BC_2) и на три порядка (B_2C) ниже. Таким образом, давление



а *б*
Рис. 4. Снимки РЭМ образцов 2-3 (*а*) и 2-4 (*б*)

Fig. 4. SEM images of samples 2-3 (*a*) and 2-4 (*b*)

Таблица 4

Table 4

Результаты седиментационного анализа образцов диборида титана

Results of sedimentation analysis of titanium diboride samples

Образец / Sample	Средний размер частиц/агрегатов, мкм / Average particle / aggregate size, μm	Стандартное отклонение, мкм / Standard deviation, μm	Образец / Sample	Средний размер частиц/агрегатов, мкм / Average particle / aggregate size, μm	Стандартное отклонение, мкм / Standard deviation, μm
2-1	7,4	2,41	2-3	11,1	2,22
2-2	8,0	2,33	2,4	11,2	2,28

паров оксидов и бора при оптимальных температурах синтеза этих тугоплавких соединений значительно (на несколько порядков) превышает давление паров углерода. Следовательно, с большой долей вероятности можно утверждать, что эти процессы осуществляются путем переноса паров высших и низших оксидов на поверхность твердого углерода (синтез карбида титана) и переноса паров высших и низших оксидов наряду с парами бора на поверхность твердого углерода (синтез диборида титана). Это типичные адсорбционные процессы. Косвенным доказательством этого являются сравнительно короткое время синтеза рассматриваемых тугоплавких соединений. Далее после осуществления химических реакций следуют диффузионные процессы (хотя они реальны и при непосредственном контакте твердых реагентов). Несомненно, положительную роль в этих сравнительно быстро протекающих процессах играет развитая поверхность НВУ. Она явно сокращает время диффузионных процес-

сов, завершающихся полным превращением реагентов в целевые соединения.

Для изготовления керамики из карбида бора с модифицирующей добавкой из диборида титана шихту можно получать на основе реакции (2) с избытком карбида бора. Полное превращение реагентов в композиционный порошок B_4C-TiB_2 происходит в области температур 1560...2200 °С [26]. Шихта, полученная по этой реакции, подвергалась компактированию. Снимок РЭМ шлифа спеченного образца представлен на рис. 5.

Светлые включения (частицы TiB_2) с размерами до нескольких десятков микрон равномерно распределены в матрице из карбида бора. Поры отсутствуют.

Выводы

Проанализированы области применения карбида и диборида титана применительно к процессам металлообработки. Карбид титана

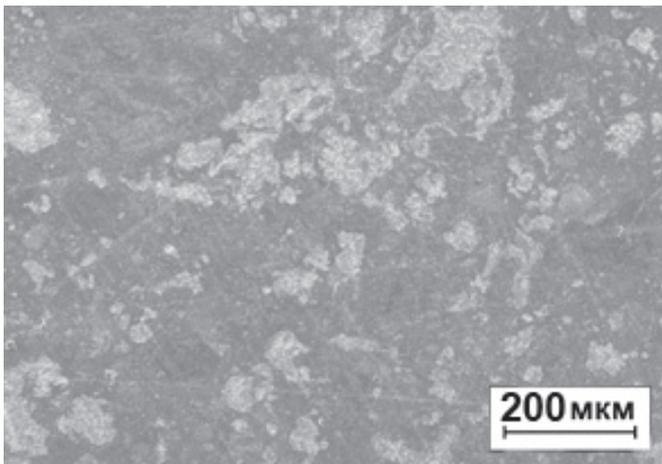


Рис. 5 Снимок РЭМ поверхности образца керамики B_4C-TiB_2

Fig. 5. SEM image of the surface of a sample of ceramic B_4C-TiB_2

применяется для изготовления безвольфрамовых твердых сплавов, износостойких покрытий, карбидосталей. Он перспективен для использования в качестве абразивного материала для доводочно-полировальных работ. Наряду с диборидом титана он применяется для изготовления режущего инструмента. Диборид титана перспективен для использования в качестве модифицирующей добавки при получении износостойкой керамики из карбида бора.

Исследованы процессы синтеза карбида и диборида титана с использованием в качестве восстановителя нановолокнистого углерода, характеризующегося высоким значением удельной поверхности (на уровне $150 \text{ м}^2/\text{г}$). Изучены некоторые характеристики полученных порошков. Содержание основного вещества в них составляет 97,5...98,0 масс.%. Процессы образования этих соединений предположительно осуществляются путем переноса паров высших и низших оксидов на поверхность твердого углерода (синтез карбида титана) и переноса паров высших и низших оксидов наряду с парами бора на поверхность твердого углерода (синтез диборида титана). Порошки высокодисперсны (средний размер частиц находится на уровне 10 микрон) и полидисперсны. По этой причине они перспективны для ряда процессов металлообработки и при получении керамики на основе карбида бора.

Список литературы

1. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. – М.: Металлургия, 1987. – 216 с.
2. Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д. Высокотемпературные бориды. – М.: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. – 368 с.
3. Mroz C. Annual minerals review: titanium diboride // American Ceramic Society Bulletin. – 1995. – Vol. 74. – P. 158–159.
4. Доронькин Е.Д. Безвольфрамовые твердые сплавы // Цветные металлы. – 1983. – № 7. – С. 45–46.
5. Reactive hot pressing of Ti–B–C and Ti–C at 1200 °C / L. Rangaraj, K. Barman, C. Divakar, V. Jayaram // Ceramics International. – 2013. – Vol. 39. – P. 5955–5961. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.12.016.
6. Mechanical properties and microstructure of TiB_2-TiC composite ceramic cutting tool material / B. Zou, C. Huang, J. Song, Z. Liu, L. Liu, Y. Zhao // International Journal of Refractory Metals and Hard materials. – 2012. – Vol. 35. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.02.011.
7. Effect of superfine refractory carbide additives on microstructure and mechanical properties of $TiB_2-TiC+Al_2O_3$ composite ceramic cutting tool materials / B. Zou, W. Ji, C. Huang, J. Wang, S. Li, K. Xu // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 585. – P. 192–202. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.09.119.
8. Fretting wear analysis of TiC/VC multilayered hard coatings: experiments and modeling approaches / S. Fouvry, B. Wendler, T. Liskiewits, M. Dudek, L. Kolodziejczyk // Wear. – 2004. – Vol. 257. – P. 641–653. – DOI: 10.1016/j.wear.2004.02.009.
9. Wang X.-h., Zou Z.-d., Qu S.-y. Microstructure of Fe-based alloy hardfacing coating reinforced by $TiC-VC$ particles // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2006. – Vol. 13 (4). – P. 51–55. – DOI: 10.1016/S1006-706X(06)60078-2.
10. Адамовский А.А. Абразивные материалы из металлоподобных тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. – 1974. – № 5. – С. 49–56.
11. Карбид титана, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза – высокоэффективный абразивный материал / А.Г. Мержанов, Г.Г. Карюк, И.П. Боровинская, С.Ю. Шаривкер, Е.И. Мошковский, В.К. Прокудина, Е.Г. Дядько // Порошковая металлургия. – 1981. – № 10. – С. 50–55.
12. Кульков С.Н., Гнюсов С.Ф. Карбидостали на основе карбидов титана и вольфрама. – Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2006. – 240 с.
13. Свистун Л.И. Карбидостали конструкционного назначения: изготовление, свойства, применение

ние (обзор) // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2009. – № 3. – С. 41–50.

14. Карбид бора / П.С. Кислый, М.А. Кузенкова, Н.И. Боднарчук, Б.Л. Грабчук. – Киев: Наукова думка, 1988. – 216 с.

15. Zhang W., Yamashita S., Kita H. Progress in pressureless sintering of boron carbide ceramics – a review // *Advances of Applied Ceramics*. – 2019. – Vol. 118 (4). – P. 222–239. – DOI: 10.1080/17436753.2019.1574285.

16. Influence of TiB_2 content on microstructure and hardness of TiB_2-B_4C composite / T.S. Srivatsan, G. Guruprasad, D. Black, R. Radhakrishnan, T.S. Sudarshan // *Powder Technology*. – 2005. – Vol. 159. – P. 161–167. – DOI: 10.1016/j.powtec.2005.08.003.

17. Heydari M.S., Baharvandi H.R. Comparing the effect of different sintering methods for ceramics on the physical and mechanical properties of B_4C-TiB_2 nanocomposites // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 51. – P. 224–232. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.04.003.

18. Microstructure and mechanical properties of pulsed electric current sintered B_4C-TiB_2 composite / S. Huang, K. Vanmeensel, O. Malek, O. Van der Biest, J. Vleugels // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – Vol. 528 (3). – P. 1302–1309. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.022.

19. Effects of carbon and silicon on microstructure and mechanical properties of pressureless sintered B_4C/TiB_2 composites / Y. Zhu, H. Cheng, Y. Wang, R. An // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 772. – P. 537–545. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.129.

20. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition / G.G. Kuvshinov, Yu.L. Mogilnykh, D.G. Kuvshinov, D.Yu. Yermakov, M.A. Yermakova, A.N. Salanov, N.A. Rudina // *Carbon*. – 1999. – Vol. 37. – P. 1239–1246.

21. Синтез полидисперсного карбида бора и получение керамики на его основе / Ю.Л. Крутский, Ю.К. Непочатов, А.Н. Пель, И.Н. Сквородин, К.Д. Дюкова, Т.М. Крутская, И.Д. Кучумова, О.Э. Матц, А.Г. Тюрин, Ю.Ю. Эмурлаева, С.И. Подрябинкин // *Журнал прикладной химии*. – 2019. – Т. 92, вып. 6. – С. 719–727. – DOI: 10.1134/S0044461819060045.

22. Blott S.J., Pye K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2001. – Vol. 26. – P. 1237–1248.

23. Свойства элементов. Ч. 1: справ. изд. / под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.

24. Казенас Е.К., Цветков Ю.В. Термодинамика испарения оксидов. – М.: ЛКИ, 2008. – 480 с.

25. Болгар А.С., Турчанин А.Г., Фесенко В.В. Термодинамические свойства карбидов. – Киев: Наукова думка, 1973. – 272 с.

26. Determination of the optimal temperature range for synthesis of B_4C-TiB_2 and B_4C-ZrB_2 powder composite materials / V.A. Shestakov, T.S. Gudyma, Yu.L. Krutskii, N.F. Uvarov // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 31. – P. 56–58. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.822.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Synthesis of titanium carbide and titanium diboride for metal processing and ceramics production

Yuri Krutskii^{1, a, *}, Evgeny Maksimovskii^{2, b}, Roman Petrov^{3, c}, Olga Netskina^{3, 4, d},
 Arina Ukhina^{5, e}, Tatiana Krutskaya^{6, f}, Tatiana Gudyma^{7, g}

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

² Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of the Siberian Branch of the RAS, 3 Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Borekov Institute of Catalysis SB RAS, 5, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁴ Novosibirsk State University, 1 Pirogova str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁵ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, 18 Kutateladze st., Novosibirsk, 630128, Russian Federation

⁶ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation

⁷ Novosibirsk Chemical Engineering College named after D.I. Mendeleev, 26 Sadovaya st., Novosibirsk, 630102, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-2524-4143>, krutskii@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1555-2719>, eugene@niic.nsc.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2335-7032>, petrov@catalysis.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2323-7372>, netskina@catalysis.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0003-1878-0538>, auhina181@gmail.com, ^f <https://orcid.org/0000-0001-8003-4523>, t.krutskaya@mail.ru,

^g <https://orcid.org/0000-0002-4724-3371>, gudymatan@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 August 2021

Revised: 24 September 2021

Accepted: 16 October 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Titanium carbide

Titanium diboride

Tungsten-free hard alloys

Carbide steel

Ceramics

Funding

The work was carried out in accordance with the state order of the Ministry of Education and Science (code FSUN 2020-0008).

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Titanium carbide and diboride are characterized by high values of hardness, chemical inertness and for this reason are widely used in modern technology. This paper provides information on the synthesis of titanium carbide and diboride by carbothermal and carbide-boron methods, respectively, on the use of titanium carbide as an abrasive and in the manufacture of tungsten-free hard alloys, carbide steels, wear-resistant coatings, as well as titanium diboride in the production of cutting tools and ceramics based on boron carbide. **The aim of this work** is to study the processes of synthesis of highly dispersed powders of titanium carbide and diboride, which are promising for the manufacture of cutting tools, wear-resistant coatings, abrasives and ceramics. **Research methods.** Titanium oxide TiO_2 , nanofibrous carbon (NFC), and highly dispersed boron carbide were used as reagents for the synthesis of titanium carbide and diboride. Experiments to obtain titanium carbide were carried out in a resistance furnace, and titanium diboride in an induction furnace. X-ray studies of the phase composition of titanium carbide and diboride samples were carried out on an *ARL X-TRA* diffractometer (*Thermo Electron SA*). The determination of the content of titanium and impurities in the samples of titanium carbide and diboride was carried out by the X-ray spectral fluorescence method on an *ARL-Advant'x* analyzer. The total carbon content in the titanium carbide samples was determined on an *S-144* device from *LECO*. The content of boron and other elements for titanium diboride samples was determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (*ICP AES*) on an *IRIS Advantage* spectrometer (*Thermo Jarrell Ash Corporation*). The surface morphology and particle sizes of the samples were studied using a *Carl Zeiss Sigma* scanning electron microscope (*Carl Zeiss*). The determination of the particle/aggregate size distribution was performed on a *MicroSizer 201* laser analyzer (*BA Instruments*). **Results.** The paper proposes technological processes for obtaining highly dispersed powders of titanium carbide and diboride. The optimum synthesis temperature for titanium carbide is 2,000...2,100 °C, and for titanium diboride 1,600...1,700 °C. The content of the basic substance is at the level of 97.5...98.0 wt. %. **Discussion.** A possible mechanism for the formation of titanium carbide and diboride is proposed, which consists in the transfer of vapors of titanium oxides to the surface of solid carbon (synthesis of titanium carbide) and vapors of boron and titanium oxides to the surface of solid carbon (synthesis of titanium diboride). Due to the high purity and dispersion values, the resulting titanium carbide powder can be used as an abrasive material and for the manufacture of tungsten-free hard alloys, carbide steels, wear-resistant coatings, and titanium diboride powder can be used for the preparation of cutting tools and ceramics based on boron carbide.

For citation: Krutskii Yu.L., Maksimovskii E.A., Petrov R.V., Netskina O.V., Ukhina A.V., Krutskaya T.M., Gudyma T.S. Synthesis of titanium carbide and titanium diboride for metal processing and ceramics production. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 155–166. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-155-166. (In Russian).

* Corresponding author

Krutskii Yuri L., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: +7-953-882-18-92, e-mail: krutskii@yandex.ru

References

1. Kiparisov S.S., Levinskii Yu.V., Petrov A.P. *Karbid titana: poluchenie, svoistva, primeneniye* [Titanium carbide: preparation, properties, application]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 216 p.
2. Serebryakova T.I., Neronov V.A., Peshev P.D. *Vysokotemperaturnye boridy* [High temperature borides]. Moscow, Metallurgiya, Chelyabinsk branch Publ., 1991. 368 p.
3. Mroz C. Annual minerals review: titanium diboride. *American Ceramic Society Bulletin*, 1995, vol. 74, pp. 158–159.
4. Doron'kin E.D. Bezvol'framovye tverdye splavy [Tungsten-free hard alloys]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1983, no. 7, pp. 45–46. (In Russian).
5. Rangaraj L., Barman K., Divacar C., Jayaram V. Reactive hot pressing of Ti–B–C and Ti–C at 1200° C. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, pp. 5955–5961. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.12.016.
6. Zou B., Huang C., Song J., Liu Z., Liu L., Zhao Y. Mechanical properties and microstructure of TiB₂–TiC composite ceramic cutting tool material. *International Journal of Refractory Metals and Hard materials*, 2012, vol. 35, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.02.011.
7. Zou B., Ji W., Huang C., Wang J., Li S., Xu K. Effect of superfine refractory carbide additives on microstructure and mechanical properties of TiB₂–TiC+Al₂O₃ composite ceramic cutting tool materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 585, pp. 192–202. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.09.119.
8. Fouvry S., Wendler B., Liskiewits T., Dudek M., Kolodziejczyk L. Fretting wear analysis of TiC/VC multi-layered hard coatings: experiments and modeling approaches. *Wear*, 2004, vol. 257, pp. 641–653. DOI: 10.1016/j.wear.2004.02.009.
9. Wang X.-h., Zou Z.-d., Qu S.-y. Microstructure of Fe-based alloy hardfacing coating reinforced by TiC-VC particles. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2006, vol. 13 (4), pp. 51–55. DOI: 10.1016/S1006-706X(06)60078-2.
10. Adamovskii A.A. Abrazivnye materialy iz metallopodobnykh tugoplavkikh soedinenii [Abrasive materials from metal-like refractory compounds]. *Poroshkovaya metallurgiya = Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1974, no. 5, pp. 49–56. (In Russian).
11. Merzhanov A.G., Karyuk G.G., Borovinskaya I.P., Sharivker S.Yu., Moshkovsky E.I., Prokudina V.K., Dyadko E.G. Karbid titana, poluchennyi metodom samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza – vysokoeffektivnyi abrazivnyi material [Titanium carbide obtained by self-propagating high-temperature synthesis is a highly efficient abrasive material]. *Poroshkovaya metallurgiya = Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1981, no. 10, pp. 50–55. (In Russian).
12. Kul'kov S.N., Gnyusov S.F. *Karbidostali na osnove karbidov titana i vol'frama* [Carbide steels based on titanium and tungsten carbides]. Tomsk, Scientific and Technical Literature Publ., 2006. 240 p.
13. Svistun L.I. Karbidostali konstruktsionnogo naznacheniya: izgotovlenie, svoistva, primeneniye (obzor) [Carbide steel for structural purposes: manufacturing, properties, application (review)]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Universities' Proceedings. Powder metallurgy and functional coatings*, 2009, no. 3, pp. 41–50. (In Russian).
14. Kislyi P.S., Kuzenkova M.A., Bodnaruk N.I., Grabchuk B.L. *Karbid bora* [Boron carbide]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 216 p.
15. Zhang W., Yamashita S., Kita H. Progress in pressureless sintering of boron carbide ceramics – a review. *Advances of Applied Ceramics*, 2019, vol. 118 (4), pp. 222–239. DOI: 10.1080/17436753.2019.1574285.
16. Srivatsan T.S., Gurupsarad G., Black D., Radhakrishnan R., Sudarshan T.S. Influence of TiB₂ content on microstructure and hardness of TiB₂–B₄C composite. *Powder Technology*, 2005, vol. 159, pp. 161–167. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.08.003.
17. Heydari M.S., Baharvandi H.R. Comparing the effect of different sintering methods for ceramics on the physical and mechanical properties of B₄C–TiB₂ nanocomposites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, vol. 51, pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.04.003.
18. Huang S., Vanmeensel K., Malek O., Biest O., Van der Vleugels J. Microstructure and mechanical properties of pulsed electric current sintered B₄C–TiB₂ composite. *Materials Science and Engineering A*, 2011, vol. 528 (3), pp. 1302–1309. DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.022.
19. Zhu Y., Cheng H., Wang Y., An R. Effects of carbon and silicon on microstructure and mechanical properties of pressureless sintered B₄C/TiB₂ composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 772, pp. 537–545. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.129.

20. Kuvshinov G.G., Mogilnykh Yu.L., Kuvshinov D.G. Yermakov D.Yu., Yermakova M.A., Salanov A.N., Rudina N.A. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition. *Carbon*, 1999, vol. 37, pp. 1239–1246.

21. Krutskii Yu.L., Nepochatov Yu.K., Pel' A.N., Skovorodin I.N., Dyukova K.D., Krutskaya T.M., Kuchumova I.D., Mats O.E., Tyurin A.G., Emurlaeva Yu.Yu., Podryabinkin S.I. Synthesis of polydisperse boron carbide and synthesis of a ceramic on its basis. *Zhurnal prikladnoi khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 2019, vol. 92, no. 6, pp. 750–758. DOI: 10.1134/S1070427219060041. (In Russian).

22. Blott S.J., Pye K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, pp. 1237–1248.

23. Samsonov G.V., ed. *Svoistva elementov* [Properties of the elements]. Pt. 1. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 216 p.

24. Kazenas E.K., Tsvetkov Yu.V. *Termodinamika ispareniya oksidov* [Thermodynamics of evaporation of oxides]. Moscow, LKI Publ., 2008. 480 p.

25. Bolgar A.S., Turchanin A.G., Fesenko V.V. *Termodinamicheskie svoistva karbidov* [Thermodynamic properties of carbides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1973. 272 p.

26. Shestakov V.A., Gudyma T.S., Krutskii Yu.L., Uvarov N.F. Determination of the optimal temperature range for synthesis of B_4C-TiB_2 and B_4C-ZrB_2 powder composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 31, pp. 56–58. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.822.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Оформление статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)», должно соответствовать по стилю и содержанию требованиям журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules. Статьи, не соответствующие этим требованиям, отклоняются и не рассматриваются редакционным советом. Кроме того, текст работы должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь структуру **IMRAD (Introduction, Methods, Results And Discussion)**:

- название (*Title*);
- аннотация (*Abstract*);
- введение (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements / Funding*);
- список литературы (*References*).

ЗАГЛАВИЕ

Название должно отражать основную идею выполненного исследования и быть по возможности кратким.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны имя и фамилия автора (ов). Ниже – полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов обязательно указываются его уникальный идентификационный код *ORCID (Open Researcher and Contributor ID)* и электронная почта (*e-mail*). Если отсутствует *ORCID*, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Указывается индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Для англоязычной части статьи УДК указывать не надо.

Ключевые слова

Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний) должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

АННОТАЦИЯ (РЕФЕРАТ)

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен

быть 200...250 слов. **Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!** Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ

Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подход, данные или анализ). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию обозначенной проблемы. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

МЕТОДЫ / МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по Государственному стандарту.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.

2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и прочее; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации, перечисленные выше, актуальны также и для теоретической, и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без выявления причинно-следственных связей не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел, для того чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов, а также для упорядочения и интерпретации результатов. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и обозначить перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие **DOI** публикации. Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать 15–17 %. Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в **References** лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе **BSI** (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>). Правила оформления англоязычного блока статьи представлены на сайте журнала в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest**»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

*Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»*

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в авторском резюме не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и 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 изменчивости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ^1H or ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^{31}P MR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.
2. Кратко излагая основные факты работы, помните следующие моменты:
 - следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;
- вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение, а также имейте в виду, что вы пишете для международной аудитории;
- текст должен быть связным, с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого;
- необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);
- стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые Авторы, внимательно ознакомьтесь с правилами оформления статьи на сайте журнала!

ШАБЛОН ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Синим цветом обозначены пояснения относительно того, что именно и как должно быть написано в данном разделе / подразделе.

После внесения соответствующих правок в разделы статьи необходимо удалить **синие подсказки**. В шаблон следует поместить все материалы и данные, которые, по вашему мнению, должны быть напечатаны в журнале (в том числе рисунки и таблицы). Заполненный шаблон статьи следует сохранить на компьютере и загрузить на сайт журнала.

Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$

(Заглавие статьи на русском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Елена Корниенко^{1, a, *}, Виктор Кузьмин^{2, b}, Александр Сивков^{3, c}

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

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

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

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienko_ee@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71 *(Указывается индекс универсальной десятичной классификации)*

История статьи:

Поступила: 1 июня 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Рецензирование: *(Дата указывается редакцией)*

Принята к печати: *(Дата указывается редакцией)*

Доступно онлайн: *(Дата указывается редакцией)*

Ключевые слова:

Плазменное напыление,

Карбид бора,

$V_4C-Ni-P$,

Покрытие.

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

АННОТАЦИЯ

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **200...250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Для цитирования: Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Сивков А.А. Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 30–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50.

(Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале.

Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

***Адрес для переписки**

Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

Основная часть статьи

1. Введение

До двух страниц краткий обзор литературы по проблеме исследования, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована **цель и задачи** исследований.

2. Методика исследований

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

3. Результаты и их обсуждение

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации по набору текста

Текст набирается в русифицированном редакторе Microsoft Word. Формат оригиналов – А4. Старайтесь использовать только следующие шрифты: Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв. Размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст статьи.

Не используйте более одного пробела – применяйте абзацные отступы и табуляцию.

Не заканчивайте строку нажатием клавиши «Enter» – используйте ее только для начала нового абзаца.

Реализуйте возможности, предоставляемые текстовым редактором: автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т. п.

Не набирайте кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами, и наоборот.

Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев.

Недопустимо тире «–» заменять дефисом «-».

В тексте и формулах (в том числе в индексах) латинские буквы набираются курсивом, а греческие и русские – прямым шрифтом.

Десятичные цифры в русскоязычных текстах набираются через запятую (0,5), а в англоязычных – через точку (0.25 вместо 0,25).

Рекомендации по набору формул

Формулы, структурные химические формулы и схемы располагаются по месту в тексте статьи.

Знаки *, ', ±, одиночные буквы греческого алфавита, одиночные наклонные или полужирные буквы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения, цифры в тексте, а также простые математические или химические формулы (например, $a^2 + b^2 = c^2$, H_2SO_4) должны набираться в текстовом режиме **без использования редактора формул**.

Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться с использованием редактора формул (Microsoft Equation). Набор формул из составных элементов, где часть формулы – таблица, часть – текст, часть – внедренная рамка, не допускается.

Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения. Их принудительное ручное изменение для отдельных символов или элементов формул не допускается!

Рекомендации по набору таблиц

Таблицы располагаются в тексте рукописи.

Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать ее **название (на русском и на английском языке!)**.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения. Например: t , °C; V , об.%; HV, МПа и т.п.

Сокращения слов в таблицах не допускаются.

Создавайте таблицы, используя возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы, набранные вручную с помощью пробелов или табуляций, не могут быть использованы.

Таблица
Table

Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия
The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

№ участка / No area	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0.08	86.55	13.03	0.3	0.02
2	57.71	22.73	8.22	2.12	9.22
3	40.37	44.53	10.23	2	2.87
4	49.65	25.69	13.10	3.23	8.33
5	44.26	26.06	7.35	9.36	12.97

Сокращения и аббревиатуры

Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

Сокращения из нескольких слов разделяются пробелами (760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр.), за исключением общеупотребительных (и т.д.; и т.п.; т.е.) и аббревиатур (РФА, КПД и т. п.).

Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: ИК-спектроскопия, ПЭ-пленка, ЖК-состояние, Na^+ -форма, ОН-группа, но группа ОН.

Размерности

Размерности отделяются от цифры пробелом (17,5 моль/м³ (17.5 mol/m³); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с², 20 °C, 50 %, 10 ‰), кроме угловых градусов (90°).

Точка после размерностей не ставится (с – секунда, г – грамм, сут – сутки, град – градус). В сложных размерностях обязательно указывается знак умножения (·): Н·м/с или кг/(с·м·Па).

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней: Дж·моль⁻¹·К⁻¹ или $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, так и скобок: J/(mol·K) или $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$, если это облегчает их прочтение.

Главное условие – соблюдение единообразия одинаковых размерностей по статье.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (10, 15 и 45 мин; от 18 до 20 мм; 30–40 Дж/моль), за исключением угловых градусов: 5°–10°, а не 5–10°.

Размерности переменных пишутся через запятую (E , Дж/моль или E , J/mol), а подлогарифмических величин – в квадратных скобках, без запятой: $\ln t$ [мин].

Точки и пробелы

Точка не ставится после названия статьи, списка авторов, списка организаций, заголовков и подзаголовков, названий таблиц и подрисуночных подписей.

Точка после сокращений не ставится в подстрочных индексах ($T_{\text{пл}}$ – температура плавления).

Ссылки на рисунки и таблицы набираются с пробелами (рис. 5, табл. 2).

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 300 К), (а).

Между знаком номера или параграфа и числом должен быть пробел (№ 1; § 5.5).

Числа с буквами в обозначениях набирают без пробелов (IVd; 1.3.14a; рис. 1, a).

В географических координатах широты отделяются пробелами: 56,5 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °E.

В географических названиях после точки ставится пробел: р. Енисей, г. Новосибирск.

Требования к иллюстрациям

Иллюстрации и подписи к ним располагаются в тексте рукописи.

Иллюстрации нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (**на русском и на английском языке!**).



Рис. 1. Внешний вид частиц порошка $B_4C-Ni-P$

Fig. 1. The particles of $B_4C-Ni-P$ powder

Общие технические требования:

иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку) либо 17–17,5 см (на две колонки);

надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому для фотографий желательно предоставить второй вариант без текста и всех обозначений, для остальных иллюстраций – располагать надписи на иллюстрации так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

на фотографиях (например, структур) обязательно должны быть указаны размерные метки;

для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки;

графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;
- толщина линий должна быть не меньше 0,5 pt;

- векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как «Noise» «Black&white noise» «Top noise»;
 - для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.
- Штриховые иллюстрации и полутоновые иллюстрации:
- должны иметь разрешение не ниже 300 dpi;
- комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:
- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4. Выводы

Выводы по результатам работы, описанным в данной статье, должны быть лаконичным.

Список литературы

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области.

Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации.

Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.

Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте.

Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий.

Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности.

Ссылки на неопубликованные работы недопустимы.

Самоцитирование не должно превышать 15–17 %.

Если работа была издана и на русском, и на английском языке (или других), то в Списке литературы и в References лучше давать ссылку на переводную работу.

В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5-2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Финансирование

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Конфликт интересов

Указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем авторы статьи считают его значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

АНГЛОЯЗЫЧНЫЙ БЛОК СТАТЬИ

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Elena Kornienko^{1, a, *}, **Viktor Kuz'min**^{2, b}, **Alexander Sivkov**^{3, c}

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

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

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienko_ee@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указывается его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.)

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 June 2017 (Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)

Revised: (Дата указывается редакцией)

Accepted: (Дата указывается редакцией)

Available online: (Дата указывается редакцией)

Keywords:

Plasma spraying

Boron carbide

B₄C-Ni-P

Coating

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

ABSTRACT

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

For citation: Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Sivkov A.A. Structure Features of B₄C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 30–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50. (in Russian)

(Авторами указывается примерная ссылка на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта)

* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

References

(Список используемой литературы на английском языке подготавливается согласно правилам, представленным на сайте журнала)

Funding (Финансирование)

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Conflicts of Interest (Конфликт интересов)

(Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest.**».)

Acknowledgements (Выражение признательности)

(Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).)

Сведения для РИНЦ

Раздел МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹Корниенко Елена Евгеньевна, ²Кузьмин Виктор Иванович, ³Сивков Александр Анатольевич

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

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

³Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

Корниенко Е.Е. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Кузьмин В.И. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Сивков А.А. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru

Структурные особенности плазменных покрытий В₄С-Ni-P

Аннотация

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200...250 слов). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

УДК 621.793.71

Ключевые слова:

плазменное напыление, карбид бора, В₄С-Ni-P, покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed В₄С / Н. Zhu, Y. Niu, С. Lin, L. Huang, Н. Ji, X. Zheng // Coating Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 1216-1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

(Список литературы оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.)

Финансирование статьи:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Дата поступления: 01.06.2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Раздел **MATERIAL SCIENCE**

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹ Kornienko Elena E., ² Kuz'min Viktor I., ³ Sivkov Alexander A.

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

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Kornienko E.E. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Kuz'min V.I. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Sivkov A.A. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Keywords:

Plasma spraying, Boron carbide, B₄C-Ni-P, Coating

МАТЕРИАЛЫ СОУЧРЕДИТЕЛЕЙ

Внимание, инженеры и технические специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией, наладкой электроавтоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков, а также студенты и аспиранты профильных специальностей вузов, соучредитель журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)» ООО Научно-производственная коммерческая фирма «МАШСЕРВИСПРИБОР» готова предоставить свои страницы под рубрику «**Системы автоматике металлорежущих и металлообрабатывающих станков**».

В представляемых для данной рубрики статьях должны быть изложены проблемы и их решения в рамках следующих тем:

- системы ЧПУ;
- станочные электроприводы;
- датчики и элементы станочной электроавтоматики;
- модернизация систем автоматике и электроприводов;
- импортозамещение;
- автоматизация разработки технологических программ для станков с ЧПУ.

Преимуществом публикации будут пользоваться статьи, где отражены разработка и производство отечественных систем и элементов электроавтоматики, а также темы, посвященные импортозамещению. Для авторов статей под указанной выше рубрикой публикация является бесплатной.

Важно! Работа должна поступить не позднее, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях по согласованию с редакцией журнала срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели. Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы **Антиплагиат**. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %. Объем материалов рубрики в одном выпуске журнала не должен превышать трех печатных страниц журнала (15 000 знаков без пробелов).

Материалы для публикации принимаются ООО Научно-производственной коммерческой фирмой «МАШСЕРВИСПРИБОР» (e-mail: mosp@chpu.ru). Рукопись статьи готовится в соответствии с [правилами оформления](https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Внимание авторов! Материалы, поступившие от лица ООО Научно-производственной коммерческой фирмы «МАШСЕРВИСПРИБОР», не индексируются в Национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ – метаданные статей не подаются в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU. Кроме того, метаданные указанных материалов соучредителя не отправляются в международную базу *Web of Science*.

Для опубликования материалов в основных рубриках журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)», индексируемых в РИНЦ и Web of Science, необходимо следовать правилам оформления и правилам подачи статей, представленных на сайте научного издания https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov .

Напоминаем, что в журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «ОМ» зарегистрирован по следующим научным специальностям: 1. 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения, 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (в рамках группы научной специальности 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение); 2. 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 – Материаловедение (по отраслям) – (в рамках группы научной специальности

05.16.00 – Металлургия и материаловедение). **Издание имеет право опубликовать научные работы только в рамках указанных специальностей!**

В связи с тем что журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)» принимает оригинальные научные статьи в формате *Full Article* – стандартный формат для завершенных научных исследований, объем основного текста работы должен составлять не менее 18–20 страниц машинописного текста через 1,5 интервала) (учитывается основная часть статьи, без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 страниц. **Научная статья должна иметь структуру *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results And Discussion*):** • Введение (*Introduction*); • Методы / Методика исследований (*Methods*); • Результаты (*Results*); • Обсуждение (*Discussion*); • Заключение (*Conclusion*).

Порядок подачи статьи в редакцию представлен на странице: https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/how_to.

Для того чтобы подать статью, **автор (все соавторы)** должен быть зарегистрирован на сайте журнала. Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Рукопись статьи готовится в соответствии с **правилами оформления** (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx. При оформлении своей работы рекомендуется воспользоваться шаблоном, представленным на сайте журнала: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_ofornleniya_OM_2020.docx.

Сканированные лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (**цветной режим сканирования, разрешение не менее 600 dpi**) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg.

По окончании всех работ обязательно **нажать кнопку «Отправить в редакцию»**.

Одновременно со статьей высылается оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается **авторский лицензионный договор**.

Все рукописи рецензируются. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Соучредители журнала
«ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)»

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



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



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



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

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-80400 от 01 марта 2021 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др.)	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

С 2015 г. опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор - *Digital Object Identifier (DOI)*. Метаданные каждой работы обязательно регистрируются в международном реестре научно-информационных материалов *CrossRef*.

Журнал индексируется в зарубежных базах данных и агрегаторах:

- Emerging Sources Citation Index (ESCI) Web of Science Core Collection;
- EBSCO (core) в базе «Applied Science & Technology Source Ultimate»;
- Ulrich's Periodicals Directory;
- ICI Journals Master List
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

Журнал представлен:

- сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- база данных eLibrary.ru, журнал индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- реферативный журнал и база данных ВИНТИ;

- электронно-библиотечная система издательства «ЛАНЬ»;
- национальный цифровой ресурс «РУКОНТ».

График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

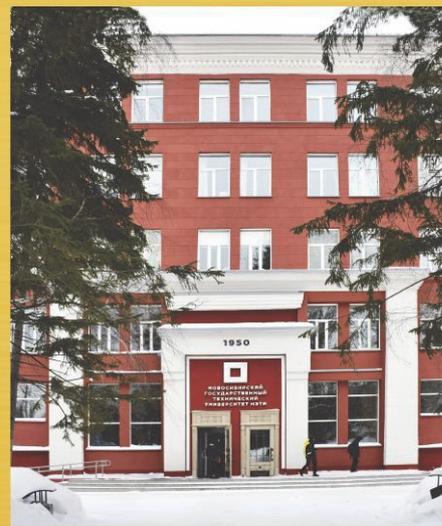
Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, корп. 5, к. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

 +7 (383) 346-17-75

 metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru



МЕРОПРИЯТИЯ

С 2014 г. научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

- Инновационные технологии в машиностроении
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты
- Материаловедение в машиностроении
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении



Официальный сайт конференции:

 <http://machine-building.conf.nstu.ru/>