

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 25, Номер 2

АПРЕЛЬ – ИЮНЬ 2023

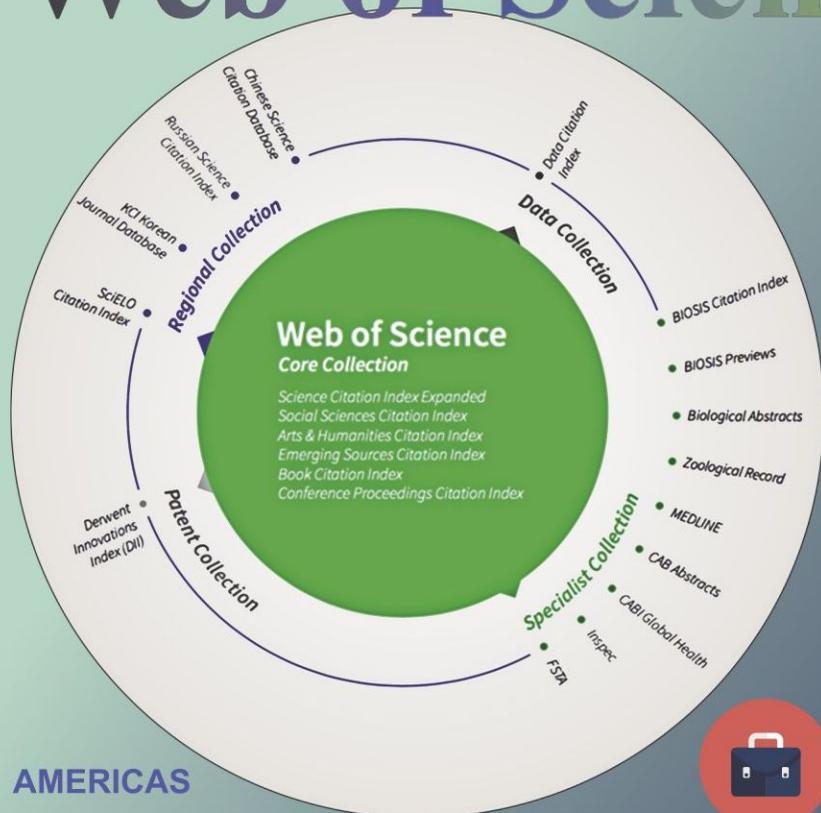
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science



Academic
Search™
Ultimate



Applied Science
& Technology
Source™ Ultimate



Business Source®
Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete
office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

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

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 25 № 2 2023 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

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

Члены совета

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

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

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

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

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

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



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

WEB OF SCIENCE



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



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

СОУЧРЕДИТЕЛИ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

Журнал зарегистрирован 01.03.2021 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80400
Индекс: **70590** по каталогу ООО «УП УРАЛ-ПРЕСС»

Адрес редакции и издателя:

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

Тел. +7 (383) 346-17-75

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

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

Цена свободная

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

- Кисель А.Г., Чуранкин В.Г.** Прогнозирование смазочных свойств СОЖ по их плотности и смачивающему действию..... 6
- Березин И.М., Залазинский А.Г., Крючков Д.И.** Аналитическая модель равноканального углового прессования титановой губки..... 17

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

- Куц В.В., Чевычелов С.А.** Теоретическое исследование кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами..... 32
- Скиба В.Ю., Зверев Е.А., Скиба П.Ю., Черников А.Д., Попков А.С.** Гибридное технологическое оборудование: к вопросу рационального выбора объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии..... 45

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Воронцов А.В., Филиппов А.В., Шамарин Н.Н., Москвичев Е.Н., Новицкая О.С., Княжев Е.О., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Денисов В.В.** In-situ анализ многослойных покрытий ZrN/CrN в процессе термического воздействия..... 68
- Корниенко Е.Е., Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Тамбовцев А.С., Тырышкин П.А.** Структура и свойства покрытий WC-10Co4Cr, полученных высокоскоростным плазменным напылением..... 81
- Балановский А. Е., Нгуен В. В., Астафьева Н.А., Гусев Р.Ю.** Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки..... 93
- Эмурлаева Ю.Ю., Лазуренко Д.В., Батаева З.Б., Петров И.Ю., Довженко Г.Д., Макагон Л.Д., Хомяков М.Н., Эмурлаев К.И., Батаев И.А.** Оценка энергии формирования вакансий в ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлах с использованием теории функционала плотности..... 104

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ 117

МАТЕРИАЛЫ СОУЧЕРЕДИТЕЛЕЙ 127

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

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

Подписано в печать 05.06.2023. Выход в свет 15.06.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 16,0. Уч.-изд. л. 29,76. Изд. № 116. Заказ 173. 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 25 No.2 2023 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

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

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

Editor of the English translation:

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

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year



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

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



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

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



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

☎ Tel.: +7 (383) 346-17-75

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

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

**EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:**

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Spain:

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

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY

- Kisel' A.G., Churankin V.G.** Predicting the coolant lubricating properties based on its density and wetting effect..... 6
- Berezin I.M., Zalazinsky A.G., Kryuchkov D.I.** Analytical model of equal-channel angular pressing of titanium sponge..... 17

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

- Kuts V.V., Chevychelov S.A.** Theoretical study of the curvature of the treated surface during oblique milling with prefabricated milling cutters..... 32
- Skeeba V.Yu., Zverev E.A., Skeeba P.Yu., Chernikov A.D., Popkov A.S.** Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source..... 45

MATERIAL SCIENCE

- Vorontsov A.V., Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N., Novitskaya O.S., Knyazhev E.O., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Denisov V.V.** In-situ analysis of ZrN/CrN multilayer coatings under heating..... 68
- Kornienko E.E., Gulyaev I.P., Kuzmin V.I., Tambovtsev A.S., Tyryshkin P.A.** Structure and properties of WC-10Co4Cr coatings obtained with high velocity atmospheric plasma spraying..... 81
- Balanovsky A.E., Nguyen V.V., Astafieva N.A., Gusev R.Yu.** Structure and properties of low carbon steel after plasma-jet hard-facing of boron-containing coating..... 93
- Emurlaeva Yu.Yu., Lazurenko D.V., Bataeva Z.B., Petrov I.Yu., Dovzhenko G.D., Makogon L.D., Khomyakov M.N., Emurlaev K.I., Bataev I.A.** Evaluation of vacancy formation energy for BCC-, FCC-, and HCP-metals using density functional theory..... 104

- EDITORIAL MATERIALS** 117

- FOUNDERS MATERIALS** 127



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Прогнозирование смазочных свойств СОЖ по их плотности и смачивающему действию

Антон Кисель^{1, а, *}, Вячеслав Чуранкин^{2, б}

¹ Калининградский государственный технический университет, Советский пр., 1, г. Калининград, 236022, Россия

² Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>, kisel1988@mail.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-6031-1340>, churvg@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.895

История статьи:

Поступила: 24 января 2023

Рецензирование: 27 февраля 2023

Принята к печати: 21 марта 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

СОЖ
 Машина трения
 Смазочное действие
 Коэффициент трения
 Эффективность СОЖ
 Плотность
 Краевой угол смачивания
 Эмпирическая зависимость

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Происходящие в зоне резания процессы способствуют быстрому износу режущего инструмента и снижению качества обрабатываемой заготовки. Уменьшения воздействия негативных факторов при обработке металлов резанием можно достичь за счет рационального выбора смазочно-охлаждающей жидкости. **Целью работы** является разработка методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, применяемых при обработке металлов резанием. **Методы.** Представлены экспериментальные исследования смазочного действия семи различных марок СОЖ при трении колодки из твердого сплава Т15К6 и вращающегося ролика из углеродистой конструкционной стали 45. В качестве параметра эффективности СОЖ по смазочному действию в статье предлагается коэффициент эффективности $K_{см}$, который равен отношению коэффициента трения, возникающего при применении СОЖ, к коэффициенту трения при трении без СОЖ. Чем меньше коэффициент $K_{см}$, тем более эффективна данная СОЖ по смазочному действию. **Результаты.** Были установлены эмпирические зависимости коэффициента $K_{см}$ от плотности СОЖ ρ и краевого угла смачивания Θ ($K_{см} = f(\rho; \Theta)$). Поскольку была установлена низкая значимость параметра ρ , в работе установлена формула зависимости $K_{см}$ только от краевого угла смачивания Θ ($K_{см} = f(\Theta)$). Установлено, что формула зависимости $K_{см} = f(\Theta)$ обеспечивает наибольшую точность расчетов. **Обсуждение.** После оценки результатов исследований, представленных в данной статье, были сделаны следующие выводы: 1) в работе установлены зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию, определенному для трения между роликом из стали 45 и колодкой из сплава Т15К6, от величины плотности СОЖ и краевого угла смачивания: $K_{см} = f(\rho; \Theta)$ и $K_{см} = f(\Theta)$; 2) наибольшую точность расчетов от 2,75 до 15 % обеспечивает формула зависимости $K_{см} = f(\Theta)$; 3) зависимость $K_{см} = f(\Theta)$ предлагается использовать для методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ при трении колодки из сплава Т15К6 и вращающегося ролика из стали 45. Предложенная методика заключается в проведении измерений краевого угла смачивания капли СОЖ на поверхности заготовки и расчете по выведенной эмпирической зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию.

Для цитирования: Кисель А.Г., Чуранкин В.Г. Прогнозирование смазочных свойств СОЖ по их плотности и смачивающему действию // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 6–16. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-6-16.

Введение

Обработка металлов резанием сопровождается множеством физических процессов, происходящих в зоне резания: высокой температурой, трением между режущим инструментом, стружкой и заготовкой, внутренним трением, большой силой резания, колебаниями режущего инстру-

мента и заготовки. Указанные процессы способствуют быстрому износу режущего инструмента и снижению качества обрабатываемой заготовки.

Устранение негативных факторов при обработке металлов резанием обеспечивается за счет рационального выбора режимов обработки, режущих инструментов и подачи в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Однако рациональному выбору СОЖ на производстве не уделяется должного внимания. При этом известно, что разные СОЖ оказывают на процесс резания различное влияние, поскольку обладают

*Адрес для переписки

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент
 Калининградский государственный технический университет,
 Советский пр., 1,
 236022, г. Калининград, Россия
 Тел.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

разными свойствами. Для выбора СОЖ, обеспечивающей требуемое качество обрабатываемой заготовки, наибольший период стойкости режущего инструмента и высокую производительность процесса обработки, нужны станочные испытания [1–5]. Однако эти испытания требуют больших затрат времени, затрат на закупку режущих инструментов и СОЖ, из которых надо выбрать наиболее эффективную. В свою очередь, лабораторные испытания являются достаточно экономичными и занимают намного меньше времени, чем станочные. Поэтому для разработки методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ было решено проводить лабораторные испытания взамен станочных.

Несмотря на достоинства лабораторных испытаний, при их проведении нет возможности воспроизвести все условия, возникающие при обработке металлов резанием. При таких испытаниях выполняют моделирование не всего процесса, а лишь некоторых его элементов, оказывающих наибольшее влияние на процесс резания [5–16].

Основываясь на научной литературе о СОЖ, можно сделать вывод, что основными функциональными действиями СОЖ являются смазочное и охлаждающее [17]. Однако моделирование даже одного из видов функциональных действий позволит выбрать СОЖ, которая уменьшит влияние негативных факторов, возникающих при обработке заготовки. Важным является только то, какое из функциональных действий наиболее существенно при заданных условиях обработки.

Одним из наиболее важных функциональных действий СОЖ является смазочное действие. Это обосновывается тем, что уменьшение силы и коэффициента трения при резании обеспечивает снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента, увеличение качества обработанной поверхности заготовки и уменьшение температуры в зоне обработки. Поэтому улучшение смазочного действия СОЖ является важной задачей.

Анализ научной литературы, опубликованной в последнее время, показал, что уменьшение влияния трения на процесс резания и сегодня является актуальной задачей. Снижения трения добиваются несколькими способами:

– добавлением в состав СОЖ частиц какого-либо вещества, оказывающего антифрикционное воздействие [1–4, 8, 9, 15–20];

– применением твердых смазочных материалов взамен жидких и противоизносных покрытий на поверхностях режущего инструмента [7, 10–12, 21, 22];

– воздействием на СОЖ различных физических явлений, таких как ультразвук, электрический ток и др. [11, 13, 14];

– применением более эффективных масел в качестве основы СОЖ [2, 20];

– повышением срока службы СОЖ за счет ее стерилизации различными способами, что позволяет дольше сохранять низкий коэффициент трения [23];

– применением в качестве СОЖ ионных жидкостей [8, 14, 24].

Несмотря на большое количество способов уменьшения трения в зоне резания, в настоящее время не решена окончательно проблема выбора наиболее эффективной СОЖ для резания металлических заготовок. Кроме того, выбор СОЖ является сложным еще и потому, что на рынке представлен достаточно большой ассортимент СОЖ, который постоянно увеличивается.

Настоящая исследовательская работа направлена на разработку методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ. Полученные результаты облегчат выбор эффективной марки СОЖ по смазочному действию. Следовательно, представленные результаты будут полезны для тех условий резания, при которых возникают большие силы трения (например, при черновом резании). Это связано с тем, что при черновой обработке устанавливают большую глубину резания и величину подачи.

Таким образом, **целью данной работы является** разработка методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, применяемых при обработке металлов резанием. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**: 1) экспериментально оценить смазочное действие СОЖ на машине трения; 2) в лабораторных условиях оценить плотность применяемых СОЖ и их смачивающее действие; 3) установить зависимости показателя смазочного действия СОЖ от их плотности и смачивающего действия одновременно и по отдельности; 4) установить точность расчетов показателя смазочного действия СОЖ по выведенным зависимостям; 5) разработать методику прогнозирования смазочных свойств СОЖ на основе лабораторных испытаний.

Методика исследований

Исследование смазочных свойств СОЖ

В исследованиях смазочного действия СОЖ применялась машина трения модели ИИ5018. Параметром оценки смазочного действия был принят действительный коэффициент трения μ .

Для оценки были взяты СОЖ на водной основе, так как этот тип СОЖ является наиболее распространенным при производстве металлических деталей. Применяемые СОЖ различных составов являлись экспериментальными разработками компании ООО НПО «Промэкология» (г. Омск). Поэтому все СОЖ были пронумерованы и обозначены как СОЖ № 1, СОЖ № 2, СОЖ № 3, СОЖ № 4, СОЖ № 5, СОЖ № 6, СОЖ № 7.

Исследования выполнялись по схеме «колодка – ролик». Колодка изготавливалась из твердого титано-вольфрамо-кобальтового сплава Т15К6, а ролик – из углеродистой конструкционной стали 45.

Принцип действия машины заключается в истирании пары образцов, прижатых друг к другу с силой P .

Применявшаяся схема испытаний «колодка – ролик» позволяет имитировать токарную обработку: роль заготовки играет вращающийся ролик из обрабатываемого материала, а роль инструмента – прижимаемая к ролику колодка из инструментального материала. Исследования проводились при силе давления на колодку $P = 1000$ Н и частоте вращения ролика $n = 250$ об/мин, соответствующих невысоким режимам. Это было сделано целенаправленно, так как при повышении режимов увеличивается сила трения и износ колодки и ролика, а коэффициент трения меняется незначительно.

В качестве параметра эффективности СОЖ по смазочному действию в настоящей статье предлагается коэффициент эффективности $K_{см}$, который равен отношению коэффициента трения, возникающего при применении СОЖ, к коэффициенту трения при трении без СОЖ. Чем меньше значение коэффициента $K_{см}$, тем более эффективна СОЖ по смазочному действию.

Поскольку целью исследований являлась разработка методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, то на следующем этапе было

решено выбрать параметры СОЖ, которые потенциально могут влиять на смазочное действие СОЖ и не потребуют применения сложного оборудования для их оценки. Одним из таких параметров является плотность (ρ , кг/м³), которую легко оценить в лабораторных условиях. Еще одним из свойств, влияющих на смазочное действие СОЖ, является ее смачивающее действие, которое оценивают по краевому углу смачивания (Θ , град) [17].

Исследование плотности СОЖ

Экспериментальная оценка плотности испытываемых СОЖ производилась с помощью весов AND DL-200 с дискретностью 0,001 г. Внешний вид применявшихся весов представлен на рис. 1.

При испытаниях каждая СОЖ заливалась в мерную емкость. Объем исследуемой СОЖ составлял 120 мл. Емкость с СОЖ устанавливалась на весы и выдерживалась 30 секунд для устранения влияния колебаний. После того как величина массы прекращала колебаться, ее значение записывалось в таблицу. Затем рассчитывались значения плотности каждой марки СОЖ по следующей формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

где m – масса СОЖ, кг; V – объем СОЖ, м³ (который равнялся $120 \cdot 10^{-6}$ м³).



Рис. 1. Внешний вид весов AND DL-200

Fig. 1. Analytical balance AND DL-200

Исследование смачивающих свойств СОЖ

Смачивающие свойства СОЖ оценивают по величине краевого угла смачивания Θ . Измерения краевых углов смачивания проводились с помощью электронного USB-микроскопа. Для этих исследований использовалась заготовка, выполненная из того же сплава, что и ролик, применявшийся при исследованиях смазочных свойств СОЖ. При испытаниях в одной плоскости с поверхностью заготовки устанавливалась ось объектива электронного микроскопа, так как в этом положении можно определить истинное значение краевого угла смачивания. Применявшийся USB-микроскоп представлен на рис. 2.

При испытаниях исследуемая СОЖ с помощью пипетки наносилась на сухую поверхность заготовки. После того как капля СОЖ принимала статическое положение, с помощью микроскопа фиксировалось изображение этой капли.



Рис. 2. Электронный USB-микроскоп

Fig. 2. Digital microscope

По такой методике были получены изображения капель всех СОЖ. Пример такого изображения представлен на рис. 3.



Рис. 3. Капля СОЖ на поверхности стальной заготовки:

1 – капля СОЖ; 2 – заготовка

Fig. 3. A drop of a coolant on the surface of a steel workpiece:

1 – a coolant drop; 2 – a steel workpiece

Оценка краевого угла смачивания каждой СОЖ на поверхности стальной заготовки производилась в компьютерной программе для черчения КОМПАС v18. При этом проводилась прямая линия, представляющая собой проекцию поверхности заготовки, а также линия, являющаяся проекцией поверхности раздела между каплей СОЖ и окружающим воздухом. В точке пересечения построенных линий строилась касательная к линии поверхности капли СОЖ. Краевым углом смачивания является угол между касательной линией к поверхности капли и проекцией поверхности стальной заготовки. Один из построенных краевых углов смачивания СОЖ представлен на рис. 4.

По описанной методике определялся краевой угол смачивания каждой из испытанных марок СОЖ.

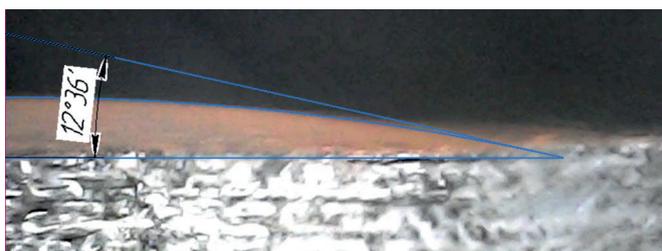


Рис. 4. Измеренное значение краевого угла смачивания СОЖ

Fig. 4. Measured value of the coolant limiting wetting angle

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты оценки смазочного действия СОЖ, их плотности и смачивающего действия представлены в табл. 1–3.

Таблица 1
 Table 1

Показатели смазочного действия СОЖ
Indicators of the coolant lubricating effect

СОЖ	μ	K_{cm}
Без СОЖ	0,604	–
СОЖ № 1	0,148	0,25
СОЖ № 2	0,117	0,19
СОЖ № 3	0,130	0,22
СОЖ № 4	0,090	0,15
СОЖ № 5	0,082	0,14
СОЖ № 6	0,119	0,20
СОЖ № 7	0,119	0,20

 Таблица 2
 Table 2

Плотности СОЖ
Coolant densities

СОЖ	ρ , кг/м ³
СОЖ № 1	947,76
СОЖ № 2	926,56
СОЖ № 3	957,60
СОЖ № 4	945,29
СОЖ № 5	953,43
СОЖ № 6	940,36
СОЖ № 7	945,14

 Таблица 3
 Table 3

Краевые углы смачивания СОЖ
Coolant limiting wetting angles

СОЖ	Θ , град
СОЖ № 1	16,13
СОЖ № 2	12,6
СОЖ № 3	10,02
СОЖ № 4	3,38
СОЖ № 5	6,2
СОЖ № 6	5,72
СОЖ № 7	9,1

В настоящем исследовании предполагается, что коэффициент эффективности СОЖ по смазочному действию K_{cm} зависит от плотности СОЖ ρ и краевого угла смачивания Θ . Для того чтобы установить эмпирическую зависимость

этих параметров, в работе применялась компьютерная программа STATISTICA 12. В результате были построены две графические зависимости $K_{cm} = f(\rho; \Theta)$, квадратичная и линейная (рис. 5). Параметром *Var1* на рис. 5 обозначен коэффициент K_{cm} , параметром *Var2* – плотность ρ , кг/м³, а параметром *Var3* – краевой угол смачивания Θ , град.

Кроме того, с помощью программы STATISTICA 12 были установлены математические формулы, описывающие представленные зависимости:

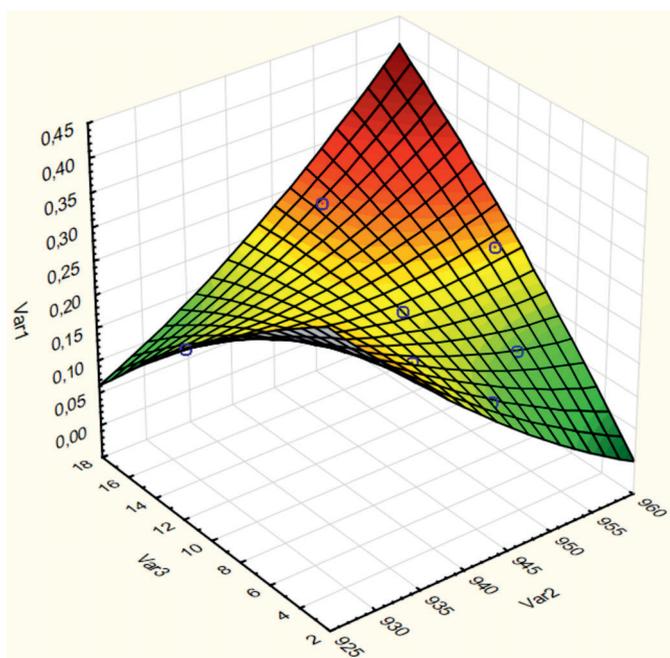
$$K_{cm} = 100,9073 - 0,2001\rho - 1,225\Theta + 9,8915 \cdot 10^{-5}\rho^2 + 0,0013\rho\Theta - 0,0003\Theta^2; \quad (2)$$

$$K_{cm} = -0,4622 + 0,0006\rho + 0,0071\Theta. \quad (3)$$

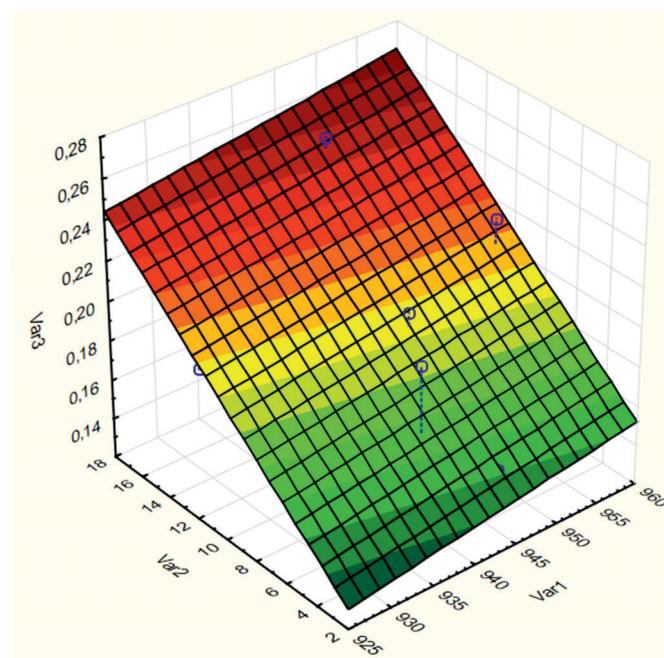
На следующем этапе исследований с целью определения наиболее точной из полученных зависимостей были выполнены расчеты по формулам (2) и (3). Полученные значения сравнивались с экспериментальными значениями K_{cm} и определялись величины относительных погрешностей расчетов. В результате было установлено, что погрешность расчетов по формуле (2) по модулю составила от 1,49 до 41,16 %. Погрешность расчетов по формуле (3) по модулю составила от 3,58 до 28,68 %. Таким образом, точность расчетов по формуле (3) в 1,44 раза выше, чем по формуле (2).

Оценка формулы (3) показывает, что постоянный коэффициент при переменной ρ существенно меньше коэффициента при переменной Θ : в 11,83 раза. Это указывает на большую значимость краевого угла смачивания при расчете коэффициента K_{cm} . Поэтому определение зависимости $K_{cm} = f(\rho)$ является нецелесообразным, и следующей целью исследования было установление зависимости $K_{cm} = f(\Theta)$. Построенный график представлен на рис. 6.

Графическая зависимость (рис. 6) аппроксимируется прямой линией. Формула, описывающая построенную прямую, также приведена на рис. 6. Путем сравнения значений K_{cm} , полученных расчетным путем, с экспериментальными значениями K_{cm} была установлена относительная погрешность расчетов: от 2,75 до 23,99 %. Следует отметить, что погрешность расчета, равная 23,99 %, была получена только



a



б

Рис. 5. Графические зависимости $K_{\text{см}} = f(\rho; \Theta)$:

a – квадратичная; б – линейная

Fig. 5. Characteristic curves $K_{\text{см}} = f(\rho; \Theta)$:

a – quadratic; б – linear

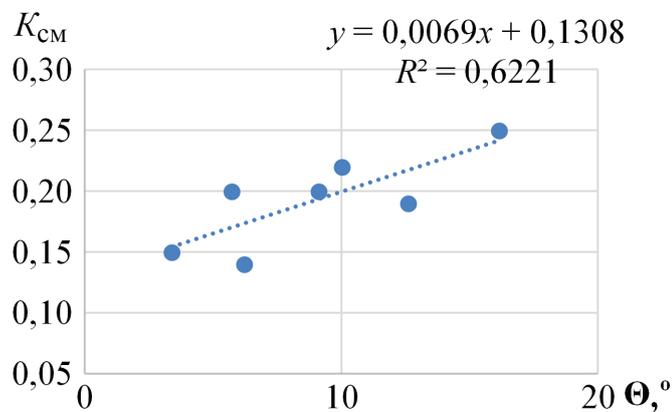


Рис. 6. Графическая зависимость $K_{\text{см}} = f(\rho; \Theta)$

Fig. 6. Characteristic curve $K_{\text{см}} = f(\Theta)$

в одной точке. Погрешность определения $K_{\text{см}}$ в других точках не превышала 15 %. Таким образом, точкой с погрешностью 23,99 % можно пренебречь.

Поскольку было установлено, что погрешность расчета по формуле зависимости $K_{\text{см}} = f(\Theta)$ наименьшая, то для прогнозирования эффективности СОЖ по смазочному действию при трении колодки из сплава Т15К6 и вращающегося

ролика из стали 45 можно использовать следующую зависимость:

$$K_{\text{см}} = 0,0069\Theta + 0,1308. \quad (4)$$

Таким образом, методика ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, применяемых при обработке металлов резанием, будет заключаться в выполнении исследований по следующему алгоритму:

1) на заготовку из требуемого материала с помощью пипетки нанести каплю исследуемой СОЖ;

2) после того как капля СОЖ приняла статическое положение, зафиксировать ее изображение с помощью электронного микроскопа;

3) с помощью программы для черчения (КОМПАС v18 или другой аналогичной) на полученном изображении провести прямую линию, представляющую собой проекцию поверхности заготовки, а также линию, являющуюся проекцией поверхности раздела между каплей СОЖ и окружающим воздухом;

4) в точке пересечения построенных линий провести касательную к поверхности капли СОЖ;

5) измерить угол между касательной линией к поверхности капли и проекцией поверхности заготовки (краевой угол смачивания);

6) рассчитать коэффициент эффективности СОЖ по смазочному действию по формуле (4) (для стальной заготовки);

7) по величине $K_{см}$ оценить эффективность СОЖ. При этом об эффективности СОЖ можно говорить в том случае, если значение $K_{см} < 0$. Чем меньше значение $K_{см}$, тем эффективнее СОЖ по смазочному действию.

Выводы

После оценки результатов исследований, представленных в данной статье, были сделаны следующие выводы.

В работе установлены зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию, определенному для трения между роликом из стали 45 и колодкой из сплава Т15К6, от величины плотности СОЖ и краевого угла смачивания: $K_{см} = f(\rho; \Theta)$, $K_{см} = f(\rho)$ и $K_{см} = f(\Theta)$.

Наибольшую точность расчетов от 2,75 до 15 % обеспечивает формула зависимости $K_{см} = f(\Theta)$:

$$K_{см} = 0,0069\Theta + 0,1308.$$

Зависимость $K_{см} = f(\Theta)$ предлагается использовать для методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ при трении колодки из сплава Т15К6 и вращающегося ролика из стали 45.

Предложенная методика заключается в проведении измерений краевого угла смачивания капли СОЖ на поверхности заготовки и расчете по выведенной эмпирической зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию.

Смазочное действие является одним из основных, но не единственным функциональным действием СОЖ. Поэтому при различных режимах обработки степень влияния этого действия на процесс резания будет разной. Применение СОЖ, выбранной по предложенной методике, окажет положительное влияние, но наибольшим эффектом окажется тогда, когда главенствующим будет смазочное действие. Например, при невысоких режимах резания, когда в зоне обработки не возникает высоких температур и смазочное действие выходит на первый план.

Список литературы

1. Quantitative analysis of cooling and lubricating effects of graphene oxide nanofluids in machining titanium alloy Ti6Al4V / G. Li, S. Yi, N. Li, W. Pan, C. Wen, S. Ding // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 271. – P. 584–598. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.035.
2. Joseph Babu K., Prabhakaran Nair K., Joy M.L. Development of cutting fluid from transesterified coconut oil and evaluation of its tribological properties // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2019. – Vol. 233 (3). – P. 369–379. – DOI: 10.1177/1350650118785467.
3. Synergism of TiO₂ and graphene as nano-additives in bio-based cutting fluid – An experimental investigation / R. Anand, A. Raina, M. Irfan Ul Haq, M.J. Mir, O. Gulzar, M.F. Wani // *Tribology Transactions*. – 2021. – Vol. 64 (2). – P. 350–366. – DOI: 10.1080/10402004.2020.1842953.
4. Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel / O. Öndin, T. Kivak, M. Sarıkaya, Ç.V. Yıldırım // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 148. – P. 106323. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106323.
5. Investigation of the role of tribolayer formation in improving drilling performance of Ti-6Al-4V using minimum quantity of lubrication / S. Bhowmick, B. Eskandari, M.Z.U. Khan, A.T. Alpas // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2021. – Vol. 235 (2). – P. 396–409. – DOI: 10.1177/1350650120933420.
6. Synthesis and tribological characteristics of a nano CuO particle-filled water-based lubricants / T. Rajmohan, D. Hemanth Kumar, R. Nivithetha, Elamburthi, V.V. Kalyan Chakravarthy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 954. – P. 012045. – DOI: 10.1088/1757-899X/954/1/012045.
7. Kumar Rakesh G., Suresh Kumar Reddy N. Tribological studies of EN31 steel and Ti-6Al-4V alloy materials using pin-on-disc tribometer // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 28 (2). – P. 1216–1220. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.509.
8. Ionic liquids as additives to cutting fluids to reduce machine tool friction and wear / C. Ferri, M. Troise, S. Lizarazo, P. Iglesias // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Proceedings (IMECE)*. – 2018. – Vol. 12. – P. V012T11A046. – DOI: 10.1115/IMECE2018-86810.
9. Experimental investigations to enhance the tribological performance of engine oil by using nano-boric acid and functionalized multiwalled carbon nanotubes: A comparative study to assess wear in bronze



alloy / B.S. Ajay Vardhaman, M. Amarnath, J. Ramkumar, P.K. Rai // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27 (6). – P. 2782–2795. – DOI: 10.1007/s11665-018-3384-9.

10. The tribological properties of titanium carbonitride TiCN coating lubricated with non-toxic cutting fluid / M. Madej, J. Kowalczyk, D. Ozimina, K. Milewski // *Materials Research Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – P. 47–53. – DOI: 10.21741/9781945291814-9.

11. Wu Z., Li S., Zhou F. Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant // *Materials Science-Medziagotyra*. – 2019. – Vol. 25 (2), pp. 159–165. – DOI: 10.5755/j01.ms.25.2.19252.

12. Electrochemical and tribological properties of CrAlN, TiAlN, and CrTiN coatings in water-based cutting fluid / Z. Wu, Z. Cheng, H. Zhang, Z. Xu, Y. Wang, F. Zhou // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – Vol. 29 (4), pp. 2153–2163. – DOI: 10.1007/s11665-020-04772-3.

13. Development of a tribotester for investigation of ferrofluids lubrication performance on the thrust pad bearing / M. Chhattal, L. Tonggang, Y. Kun, L.Ü. Xin, L. Guangsheng // *Tribology Transactions*. – 2020. – Vol. 63 (6). – P. 1095–1102. – DOI: 10.1080/10402004.2020.1794092.

14. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation / M. Michalec, P. Svoboda, I. Krupka, M. Hartl, A. Vencel // *Friction*. – 2020. – Vol. 8 (5). – P. 982–994. – DOI: 10.1007/s40544-019-0342-y.

15. Preliminary investigations on the tribological performance of hexagonal boron nitride nanofluids as lubricant for steel/steel friction pairs / J. He, J. Sun, Y. Meng, X. Yan // *Surface Topography: Metrology and Properties*. – 2019. – Vol. 7 (1). – P. 015022. – DOI: 10.1088/2051-672X/ab0afb.

16. Zhao C., Chen Y.K., Ren G. A study of tribological properties of water-based ceria nanofluids // *Tribology and Lubrication Technology*. – 2017. – Vol. 73 (3). – P. 56–66.

17. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids / Z. Said, M. Gupta, H. Hegab, N. Arora, A.M. Khan, M. Jamil, E. Bellos // *International Journal*

of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105 (5–6). – P. 2057–2086. – DOI: 10.1007/s00170-019-04382-x.

18. Investigation on the effects of nanoparticles on cutting fluid properties and tribological characteristics / N. Madanchi, S. Zellmer, M. Winter, F. Flach, G. Garnweitner, C. Herrmann // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. – 2019. – Vol. 6 (3). – P. 433–447. – DOI: 10.1007/s40684-019-00053-0.

19. Cetin M.H., Korkmaz S. Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – P. 106273. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106273.

20. Tribological investigation of r-GO additived biodegradable cashew nut shells liquid as an alternative industry lubricant / S. Bhaumik, V. Paleu, R. Pathak, R. Maggirwar, J.K. Katiyar, A.K. Sharma // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 135. – P. 500–509. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.007.

21. Influence of C content on the structure, mechanical and tribological properties of CrAlCN films in air and water-based cutting fluid / M. Zhang, F. Zhou, H. Fang, Z. Wu // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. – 2020. – Vol. 126 (8). – DOI: 10.1007/s00339-020-03782-1.

22. Ozimina D., Madej M., Kowalczyk J. Determining the tribological properties of diamond-like carbon coatings lubricated with biodegradable cutting fluids // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2017. – Vol. 62 (4). – P. 2065–2072. – DOI: 10.1515/amm-2017-0306.

23. Tribological properties of cutting fluid sterilized by atmospheric-pressure plasma treatment / J. Miyamoto, M. Kodama, S. Kawada, R. Tsuboi // *Tribology Online*. – 2018. – Vol. 13 (5). – P. 248–253. – DOI: 10.2474/trol.13.248.

24. Panneer R., Panneerselvam T. Experimental investigation on the effect of ionic liquids (C₁₆H₃₆BrP and C₁₆H₃₆BrN) on the tribological performance of neem oil // *International Journal of Surface Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 14 (1). – P. 16–33. – DOI: 10.1504/ijsurfse.2020.105877.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Predicting the coolant lubricating properties based on its density and wetting effect

Anton Kisel'^{1, a, *}, Vyacheslav Churankin^{2, b}

¹ Kaliningrad State Technical University, 1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

² Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>, kisel1988@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6031-1340>, churvg@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 January 2023

Revised: 27 February 2023

Accepted: 21 March 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Coolant

Friction machine

Lubricating action

Coefficient of friction

Coolant efficiency

Density

Limiting wetting angle

Empirical dependence

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. The processes occurring in the cutting zone contribute to the rapid wear of the cutting tool and a decrease in the quality of the workpiece. It is possible to reduce the impact of negative factors during metal cutting through a rational choice of coolant. The **aim of the work** is to develop a methodology for the accelerated assessment of the coolant lubricating properties. **Methods.** This paper presents experimental studies of the lubricating effect of seven different grades of coolant, during friction of a *T15K6* (15 % TiC–79% WC–6 % Co) hard alloy pad and a rotating roller made of carbon structural *Steel 45* (0.45 % C) are presented. As a parameter of coolant efficiency in terms of lubricating effect, this paper proposes an efficiency coefficient K_c , which is equal to the ratio between the friction coefficient that occurs when using coolant and the friction coefficient during friction without coolant. The lower the coefficient K_c , the more effective this coolant is in terms of lubricating effect. **Results.** Empirical dependences of the coefficient K_c on the coolant density ρ and the limiting wetting angle Θ ($K_c = f(\rho; \Theta)$) are established. Since the low significance of the parameter ρ is established, the formula for the dependence of the K_c only on the limiting wetting angle Θ ($K_c = f(\Theta)$) is established in the work. It is established that the dependence formula ($K_c = f(\Theta)$) provides the highest accuracy of calculations. **Discussion.** After evaluating the research results presented in this paper, the following conclusions are made: 1) the paper establishes the influence of the coolant density and the limiting wetting angle on the coolant efficiency coefficient for the lubricating effect determined for the friction between a roller made of *Steel 45* and a pad made of *T15K6* alloy: $K_c = f(\rho; \Theta)$ and $K_c = f(\Theta)$; 2) the greatest accuracy of calculations from 2.75 to 15 % is provided by the formula for the dependence $K_c = f(\Theta)$; 3) the dependence $K_c = f(\Theta)$ is proposed to be used for the method for the accelerated assessment of the coolant lubricating properties during friction of a pad made of *T15K6* alloy and a rotating roller made of *Steel 45*. The proposed method consists in measuring the limiting wetting angle of a coolant drop on the surface of the workpiece and calculating the derived empirical dependence of the coolant efficiency coefficient on the lubricating effect.

For citation: Kisel' A.G., Churankin V.G. Predicting the coolant lubricating properties based on its density and wetting effect. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 6–16. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-6-16. (In Russian).

References

- Li G., Yi S., Li N., Pan W., Wen C., Ding S. Quantitative analysis of cooling and lubricating effects of graphene oxide nanofluids in machining titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 271, pp. 584–598. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.035.
- Joseph Babu K., Prabhakaran Nair K., Joy M.L. Development of cutting fluid from transesterified coconut oil and evaluation of its tribological properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2019, vol. 233 (3), pp. 369–379. DOI: 10.1177/1350650118785467.

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Kaliningrad State Technical University,
 1 Sovetsky Prospekt,
 236022, Kaliningrad, Russian Federation
 Tel.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

3. Anand R., Raina A., Irfan Ul Haq M., Mir M.J., Gulzar O., Wani M.F. Synergism of TiO₂ and graphene as nano-additives in bio-based cutting fluid – An experimental investigation. *Tribology Transactions*, 2021, vol. 64 (2), pp. 350–366. DOI: 10.1080/10402004.2020.1842953.
4. Öndin O., Kıvık T., Sarıkaya M., Yıldırım Ç.V. Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel. *Tribology International*, 2020, vol. 148, p. 106323. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106323.
5. Bhowmick S., Eskandari B., Khan M.Z.U., Alpas A.T. Investigation of the role of tribolayer formation in improving drilling performance of Ti-6Al-4V using minimum quantity of lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235 (2), pp. 396–409. DOI: 10.1177/1350650120933420.
6. Rajmohan T., Hemanth Kumar D., Nivithetha R., Elamburthi, Kalyan Chakravarthy V.V. Synthesis and tribological characteristics of a nano CuO particle-filled water-based lubricants. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 954, p. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/954/1/012045.
7. Kumar Rakesh G., Suresh Kumar Reddy N. Tribological studies of EN31 steel and Ti-6Al-4V alloy materials using pin-on-disc tribometer. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 28 (2), pp. 1216–1220. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.509.
8. Ferri C., Troise M., Lizarazo S., Iglesias P. Ionic liquids as additives to cutting fluids to reduce machine tool friction and wear. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Proceedings (IMECE)*, 2018, vol. 12, p. V012T11A046. DOI: 10.1115/IMECE2018-86810.
9. Ajay Vardhaman B.S., Amarnath M., Ramkumar J., Rai P.K. Experimental investigations to enhance the tribological performance of engine oil by using nano-boric acid and functionalized multiwalled carbon nanotubes: A comparative study to assess wear in bronze alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, vol. 27 (6), pp. 2782–2795. DOI: 10.1007/s11665-018-3384-9.
10. Madej M., Kowalczyk J., Ozimina D., Milewski K. The tribological properties of titanium carbonitride TiCN coating lubricated with non-toxic cutting fluid. *Materials Research Proceedings*, vol. 5, pp. 47–53. DOI: 10.21741/9781945291814-9.
11. Wu Z., Li S., Zhou F. Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant. *Materials Science-Medziagotyra*, 2019, vol. 25 (2), pp. 159–165. DOI: 10.5755/j01.ms.25.2.19252.
12. Wu Z., Cheng Z., Zhang H., Xu Z., Wang Y., Zhou F. Electrochemical and tribological properties of CrAlN, TiAlN, and CrTiN coatings in water-based cutting fluid. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29 (4), pp. 2153–2163. DOI: 10.1007/s11665-020-04772-3.
13. Chhattal M., Tonggang L., Kun Y., Xin L.Ü., Guangsheng L. Development of a tribotester for investigation of ferrofluids lubrication performance on the thrust pad bearing. *Tribology Transactions*, 2020, vol. 63 (6), pp. 1095–1102. DOI: 10.1080/10402004.2020.1794092.
14. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M., Vencel A. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. *Friction*, 2020, vol. 8 (5), pp. 982–994. DOI: 10.1007/s40544-019-0342-y.
15. He J., Sun J., Meng Y., Yan X. Preliminary investigations on the tribological performance of hexagonal boron nitride nanofluids as lubricant for steel/steel friction pairs. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, vol. 7 (1), p. 015022. DOI: 10.1088/2051-672X/ab0afb.
16. Zhao C., Chen Y.K., Ren G. A study of tribological properties of water-based ceria nanofluids. *Tribology and Lubrication Technology*, 2017, vol. 73 (3), pp. 56–66.
17. Said Z., Gupta M., Hegab H., Arora N., Khan A.M., Jamil M., Bellos E. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105 (5–6), pp. 2057–2086. DOI: 10.1007/s00170-019-04382-x.
18. Madanchi N., Zellmer S., Winter M., Flach F., Garnweitner G., Herrmann C. Investigation on the effects of nanoparticles on cutting fluid properties and tribological characteristics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2019, vol. 6 (3), pp. 433–447. DOI: 10.1007/s40684-019-00053-0.
19. Cetin M.H., Korkmaz S. Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method. *Tribology International*, 2020, vol. 147, p. 106273. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106273.
20. Bhaumik S., Paleu V., Pathak R., Maggirwar R., Katiyar J.K., Sharma A.K. Tribological investigation of r-GO additived biodegradable cashew nut shells liquid as an alternative industry lubricant. *Tribology International*, 2019, vol. 135, pp. 500–509. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.007.

21. Zhang M., Zhou F., Fang H., Wu Z. Influence of C content on the structure, mechanical and tribological properties of CrAlCN films in air and water-based cutting fluid. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2020, vol. 126 (8). DOI: 10.1007/s00339-020-03782-1.

22. Ozimina D., Madej M., Kowalczyk J. Determining the tribological properties of diamond-like carbon coatings lubricated with biodegradable cutting fluids. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, vol. 62 (4), pp. 2065–2072. DOI: 10.1515/amm-2017-0306.

23. Miyamoto J., Kodama M., Kawada S., Tsuboi R. Tribological properties of cutting fluid sterilized by atmospheric-pressure plasma treatment. *Tribology Online*, 2018, vol. 13 (5), pp. 248–253. DOI: 10.2474/trol.13.248.

24. Panneer R., Panneerselvam T. Experimental investigation on the effect of ionic liquids ($C_{16}H_{36}BrP$ and $C_{16}H_{36}BrN$) on the tribological performance of neem oil. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2020, vol. 14 (1), pp. 16–33. DOI: 10.1504/ijsurfse.2020.105877.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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



Аналитическая модель равноканального углового прессования титановой губки

Иван Березин^{1, 2, a}, Александр Залазинский^{3, b}, Денис Крючков^{3, c, *}

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

² ООО «Гайд Системс», ул. Родонитовая, 186, г. Екатеринбург, 620089, Россия

³ Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8674-3352>,  i.m.berezin@urfu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8352-5475>,  zalaz@list.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8585-3544>,  kru4koff@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7

История статьи:

Поступила: 28 февраля 2023

Рецензирование: 29 марта 2023

Принята к печати: 28 апреля 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Модель

Равноканальное угловое прессование

Титановая губка

МКЭ

Финансирование

Работа выполнена в рамках программы ФНИ государственных академий наук по теме № 0391-2019-0005 «Разработка научных основ проектирования оптимальных технологий пластического формоизменения металлических материалов с гарантированным уровнем сплошности и физико-механических свойств».

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение равноканального углового прессования (РКУП) металлического порошка позволяет получить практически беспористые заготовки с высокой твердостью, высоким уровнем накопленной деформации и образованием ультрамелкозернистой структуры. Актуальным вопросом для исследования полунепрерывного процесса РКУП остается надежная оценка энергосиловых параметров процесса и прогнозирование пористости спрессованных материалов. Это, в свою очередь, связано с необходимостью разработки достаточно точных, надежных и простых для практического применения математических моделей. **Целью работы** является разработка аналитической модели процесса равноканального углового прессования пористого материала. В качестве модели материала для исследования выбран порошкообразный отсев губчатого титана марки ТГ-100. **Объектом исследования** является процесс полунепрерывного равноканального углового прессования осесимметричного пористого брикета титановой губки в канале пресс-формы. Предполагается, что при РКУП используется пуансон для создания противодействия. Для решения определены схема процесса, статически допустимая схема нагрузки на слой интенсивной деформации и кинематически допустимая схема течения пластически сжимаемой среды в слое. В соответствии с принятыми схемами построена система уравнений, применяется уравнение баланса мощности. Аналитическое уравнение решается методом последовательных приближений. Осуществлено имитационное моделирование методом конечных элементов процесса РКУП пористого титана при углах пересечения каналов пресс-формы в 45°, 50°, 55° и 60°. Определена пористость заготовки на разных стадиях процесса РКУП. С использованием аналитического решения и конечно-элементного моделирования получена диаграмма изменения давления на пуансон. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что результаты аналитического решения согласуются с данными имитационного конечно-элементного моделирования. Наибольший уровень напряжений возникает в процессе равноканального углового прессования при $\alpha = 45^\circ$, однако при этом распределение относительной плотности по сечению наиболее равномерно. При увеличении угла α максимальное значение давления на рабочий пуансон уменьшается. Рациональные технологические параметры прессования пористых заготовок должны обеспечивать максимально допустимые давления на деформирующий инструмент. Согласно этому условию в каждом конкретном процессе РКУП из аналитического решения возможно определить оптимальное значение угла.

Для цитирования: Березин И.М., Залазинский А.Г., Крючков Д.И. Аналитическая модель равноканального углового прессования титановой губки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 17–31. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-17-31.

*Адрес для переписки

Крючков Денис Игоревич, к.т.н., научный сотрудник
 Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова
 Уральского отделения Российской академии наук,
 ул. Комсомольская, 34,
 620049, г. Екатеринбург, Россия
 Тел.: 8 (343) 374-50-51, e-mail: kru4koff@bk.ru

Введение

Сущность процесса интенсивной пластической деформации (ИПД) заключается в пластической обработке, осуществляемой при температурах ниже порога рекристаллизации

деформируемого материала, с высоким уровнем накопленной деформации и приводящей к образованию ультрамелкозернистых структур в металлах. Известно довольно много методов ИПД: кручение под высоким давлением [1], пакетная прокатка [2], всесторонняя ковка [3], циклическое выдавливание и сжатие, также называемые «прессованием в виде песочных часов» [4], равноканальное угловое прессование [5] и др. Подробный обзор методов ИПД выполнили Р.З. Валиев и др. [6] и В.М. Сегал [7]. Стремление к повышению показателей производительности процессов ИПД стимулировало разработку различных способов непрерывного прессования. К способам непрерывного прессования, нашедшим наиболее широкое применение в промышленности, относятся конформ (формование длинномерного металлопроката методом непрерывного выдавливания), линекс [8] и совмещенная прокатка-прессование [8–9]. В работе В.М. Сегала [10] были рассмотрены теоретические аспекты процесса, объединяющего методы равноканального углового прессования и конформ.

ИПД порошковых и пористых материалов реализует сложное напряженно-деформированное состояние, характеризуемое совместным объемным сжатием и сдвигом [11]. Процесс консолидации из чистого алюминиевого порошка методом равноканального углового прессования с кручением описан в работе [5], где показано, что многократное повторение ИПД позволяет накапливать структурные изменения в материале. Это способствует более эффективному закрытию крупных дефектов строения, а также повышает количество и размеры участков механического сцепления частиц за счет инициирующего влияния сдвиговой деформации. В работе [12] показано, что ИПД для пористого титана и пористого титан-магниевого композита позволяет получить ультрамелкозернистую структуру и хороший контакт между частицами.

Особый интерес вызывает метод равноканального углового прессования (РКУП) порошковых и пористых материалов. В работе [13] показано, что применение РКУП металлического порошка позволяет получить практически беспористые заготовки с высокой твердостью даже после однократного прессования. Однако особенно важным преимуществом РКУП является

возможность консолидации порошковых и пористых материалов при более низких температурах в сравнении с температурой, необходимой при традиционных методах порошковой металлургии [14].

Вместе с тем большой практический интерес представляет получение полуфабрикатов из порошкообразного сырья труднодеформируемых и малопластичных сплавов и металлов, таких как титан, с однородными свойствами и минимальной пористостью. Уменьшение стоимости титановых порошковых изделий напрямую зависит от удешевления методов производства и обработки давлением титановых порошков. Большой интерес вызывают методы производства порошкового титана, близкого по своим физико-механическим свойствам и морфологии отдельных частиц к губчатому титану, полученному традиционным методом Кролла. Компанией International Titanium Powder (Cristal US Inc., США) разработан процесс получения титанового порошка (Armstrong process), пригодного для изготовления методом порошковой металлургии деталей ответственного назначения. Chen и соавторы [15] изучили процесс холодного компактирования Armstrong-порошков системы Ti-6Al-4V. По данным, приведенным в работе [16], указанная технология позволяет снизить стоимость производства готовых титановых изделий не менее чем в два раза. Авторы работы [17] представили электрохимический метод (Cambridge process) для прямого восстановления твердого TiO₂. Технология Rapid Plasma Quench Process (Idaho Titanium Technologies, USA) основана на использовании энергии высокотемпературной плазмы и позволяет снизить стоимость производства высококачественного титанового порошка [18]. В работе [19] предложен способ получения дешевого титанового порошка из титановой губки с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Применение методов интенсивной пластической деформации для указанных материалов позволит получать высокоплотные заготовки без применения традиционной энерго- и трудозатратной технологии производства титана.

Стоит отметить, что измельченная титановая губка и порошковые композиции на ее основе являются перспективными материалами для из-

готовления порошковых титановых изделий, от которых требуется высокая коррозионная стойкость, малая масса и удовлетворительные прочностные свойства при низкой стоимости исходного сырья. Компания NORSK Titanium (Норвегия) получила два патента на производство сварочной проволоки непосредственно из титановой губки (Patent WO2011049465, Patent WO2012127426). В работе [20] исследовано влияние комбинированной обработки, включающей наводороживание / удаление водорода и прокатку, на структуру и механические свойства плит из губчатого титана, спрессованных ударной волной. Авторы работы [21] показали возможность применения пористого материала на основе гранул титановой губки при производстве имплантов для остеоинтеграции. В работе [22] исследован процесс одноосного прессования в матрице губчатого порошка титана. В работах [23–25] исследовано влияние легирования водородом на свойства брикетов, изготовленных из губчатого титана прессованием.

Разнообразие технологий получения полуфабрикатов и реологические особенности порошкообразного титана приводят к необходимости предварительных расчетов с целью разработки конкретных технических устройств для их реализации. Актуальным вопросом для исследования полунепрерывного равноканального углового прессования (РКУП) до настоящего времени остается надежная оценка энергосиловых параметров процесса и прогнозирование пористости спрессованных материалов. Это, в свою очередь, связано с необходимостью разработки достаточно точных, надежных и простых для практического применения математических моделей.

Цель работы: для совершенствования технологических процессов изготовления заготовок и изделий разработать модель процесса полунепрерывного равноканального углового прессования титаносодержащего сырья.

Для достижения поставленной цели необходимо определить схему равноканального углового прессования, статически допустимую схему нагрузки на слой интенсивной деформации и кинематически допустимую схему течения пластически сжимаемой среды в слое; построить систему уравнений и сравнить решение, получаемое с помощью разработанной системы уравнений, с решением методом конечных элементов.

Материал и методика исследования

Объектом исследования является процесс полунепрерывного равноканального углового прессования (РКУП) осесимметричного пористого брикета (ϑ_b – исходная пористость) титановой губки в канале пресс-формы, имеющей входную часть b и пересекающую ее под углом 2α выходную часть 5 (рис. 1). Протяженность заготовки во входной и выходной частях канала в текущий момент времени – L_1 и L_2 соответственно; L_b – исходная длина брикета, dl – перемещение рабочего пуансона 1 ; D – диаметр канала. Пуансон 1 создает давление P_1 на брикет. Устройство содержит также пуансон 2 для создания противодействия (давления P_2 , препятствующего истечению деформируемого материала из канала пресс-формы). Пуансон 2 используется в первом цикле прессования. Во втором и последующих циклах противодействие создает пресс-остаток 4 предшествующего цикла. Течению деформируемого материала в канале пресс-формы препятствуют силы трения на поверхности выдавливаемой заготовки.

Угловое прессование обеспечивает интенсивные пластические деформации сдвига в тонком слое, расположенном в окрестности сечения А–В (рис. 1) и разделяющем входную I и выходную II части канала пресс-формы. При этом в результате объемного сжатия и интенсивной деформации сдвига в слое А–В уменьшается пористость титановой губки. Во входной части b пресс-формы деформируемый материал испытывает напряженное состояние, подобное обычному прессованию пластически сжимаемой массы в закрытой пресс-форме [26, 27].

В качестве материала для исследования использовали порошкообразный губчатый титан марки ТГ-100 (состав соответствует ГОСТ 17747–79) (рис. 2) без дополнительной обработки (просеивания, вторичного дробления, очистки и др.). Предполагается, что материал титановой губки предварительно компактируется двухсторонним прессованием до брикетов с относительной пористостью $\vartheta_b = 0,4$. Материал брикетов считали однородным в статистическом смысле.

Результаты и их обсуждение

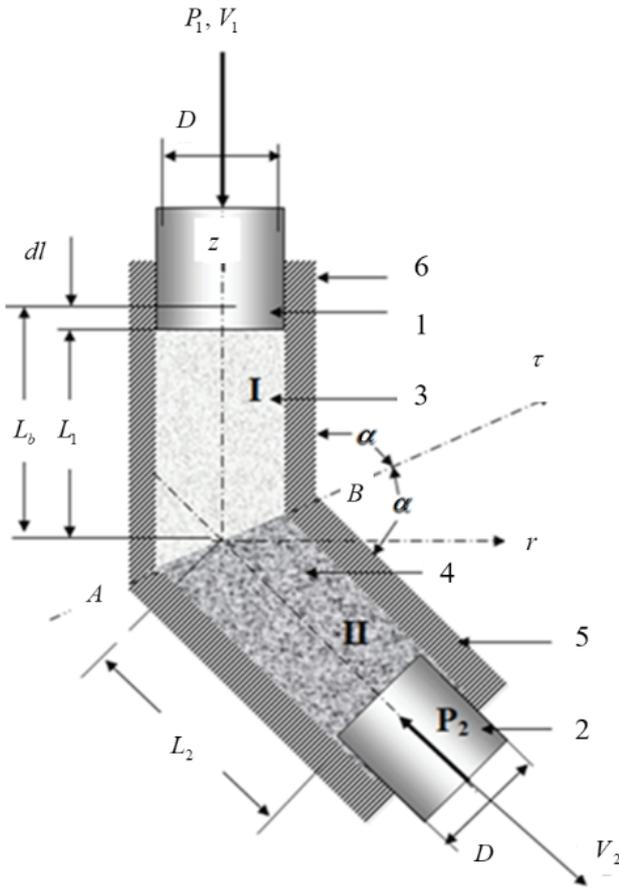


Рис. 1. Схема равноканального углового прессования:

1 – пуансон, создающий рабочее давление; 2 – пуансон, создающий противодействие; 3 – часть выдавливаемой заготовки (брикета); 4 – пресс-остаток (спрессованная часть заготовки); 5, 6 – части пресс-формы с выходным II и входным I каналами

Fig. 1. Scheme of equal-channel angular pressing:

1 – punch creating working pressure; 2 – punch for back pressure; 3 – part of the extruded blank; 4 – pressed part of the blank; 5, 6 – parts of the a pressing tool with output II and input I channels

В каждом цикле равноканального углового прессования выделяется две стадии. В первой стадии процесса обрабатываемый материал в части II канала пресс-формы не деформируется, при этом в части I осуществляется одноосное сжатие пористой массы. Перемещение dl пуансона l приводит к возникновению и росту усилия прессования P_1 , которое достигает некоторого максимального значения P_1^* , соответствующего общему течению деформируемого материала в канале пресс-формы. Действие контактного трения в пресс-форме приводит к снижению давлений в сжимаемых частицах по мере движения их вдоль линий тока. При этом наибольшее давление испытывают частицы, расположенные в непосредственной близости от рабочего пуансона; в соответствии с приложенными усилиями возможно уменьшение пористости. Во второй стадии процесса происходит истечение прессуемого материала из канала пресс-формы. В сечении А–В, разделяющем части 5 и 6 пресс-формы, действует усилие P_2^n , создающее противодействие истечению пластически сжимаемой среды (рис. 3, а).

Усилие P_{AB} определяется условиями равновесия сил, действующих на сжимаемый материал в канале пресс-формы:

$$P_{AB} = P_2 + \pi\tau_{c2}DL_2, \quad (1)$$

где P_2 – усилие, создающее противодействие; τ_{c2} – напряжение трения скольжения на поверхности пресс-формы; L_2 – длина пресс-остатка; D – диаметр канала.

Для определения силовых параметров второй стадии процесса РКУП применили уравнение баланса мощности:

$$P_1V_1 - P_2V_2 = \pi D(\tau_{c1}L_1V_1 + \tau_{c2}L_2V_2) + W|_{AB}, \quad (2)$$

где V_1, V_2 – скорости течения пластически сжимаемой массы из каналов I и II пресс-формы; $W|_{AB}$ – диссипация мощности в слое интенсивной деформации (толщина слоя $\Delta h \rightarrow 0$).

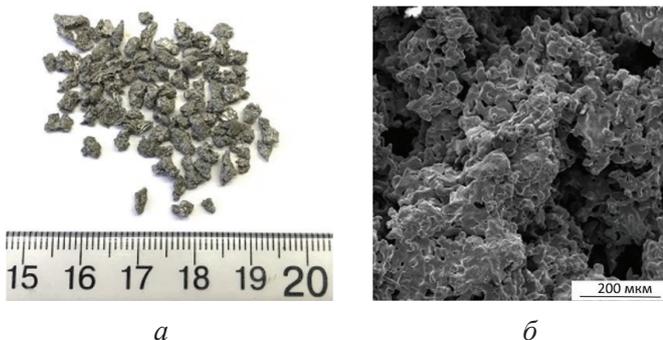


Рис. 2. Титановая губка (а); морфология частицы (б)

Fig. 2. Titanium sponge (а); particle morphology (б)

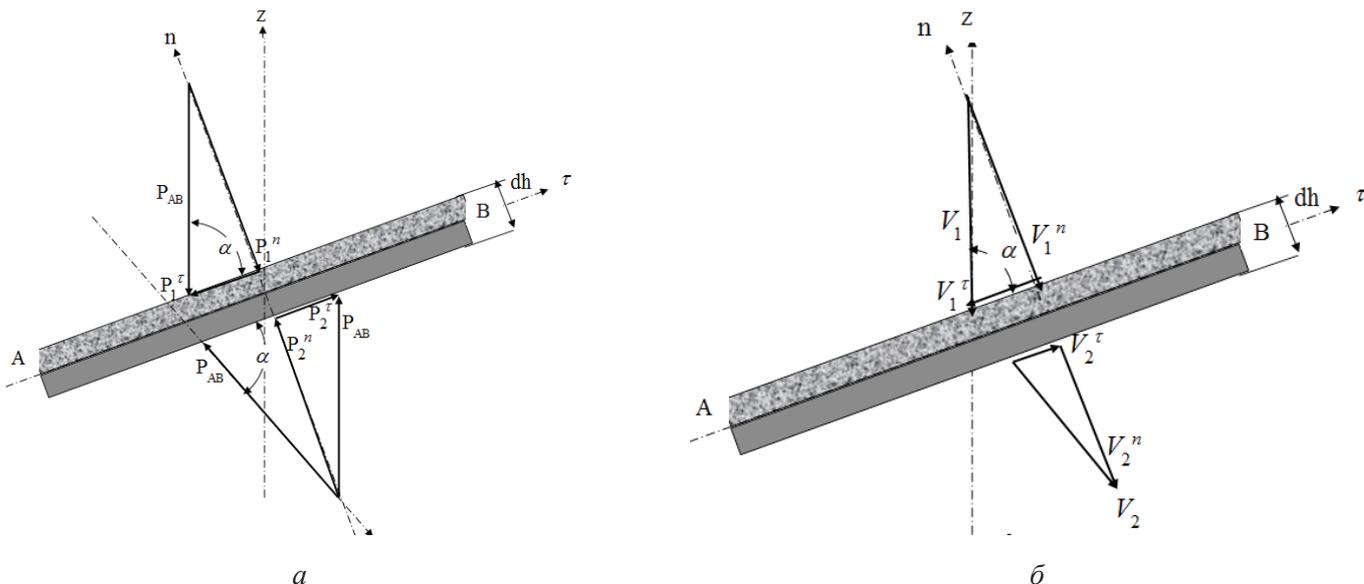


Рис. 3. Статически допустимая схема нагрузки на слой интенсивной деформации (а) и кинематически допустимая схема течения пластически сжимаемой среды в слое А–В (б)

Fig. 3. A statically permissible scheme of loading on a layer of severe deformation (a) and a kinematically permissible flow scheme of a plastically compressible medium in a layer A–B (b)

Физические уравнения представительного элемента объема пластически сжимаемой среды [28–30] имеют вид

$$\sigma_{ij} = \sigma + 2 \frac{T(\vartheta)}{H} \left(\xi_{ij} - \frac{1}{3} \xi \delta_{ij} \right), \quad (3)$$

где σ_{ij} , ξ_{ij} – компоненты тензора напряжений и тензора скорости деформации; σ – среднее нормальное напряжение; ξ – скорость объемной деформации; T – интенсивность напряжений сдвига; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; δ_{ij} – символ Кронекера.

Пределы текучести при сдвиге τ_s^* и изостатическом сжатии p_s^* в зависимости от относительной пористости ϑ деформируемой среды заданы соотношениями:

$$\begin{aligned} \tau_s^* &= T = \tau_s (1 - \vartheta^{2/3}); \\ p_s^* &= -\sigma = -\frac{2}{\sqrt{3}} \tau_s \ln \vartheta, \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_s – предел текучести на сдвиг частиц титана; ϑ – относительная пористость элемента объема титановой губки.

Зависимости $\tau_s^* / \tau_s = f_\tau(\vartheta)$ и $p_s^* / \tau_s = f_p(\vartheta)$ показаны на (рис. 4).

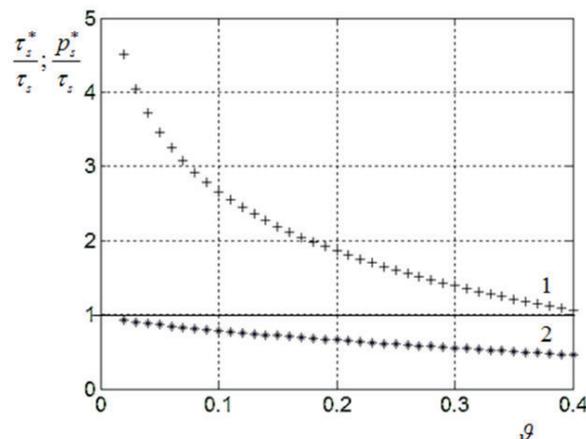


Рис. 4. Зависимость пределов текучести сжимаемой среды от пористости ϑ :

1 – при изостатическом сжатии $p_s^* / \tau_s = f_p(\vartheta)$;

2 – при сдвиге $\tau_s^* / \tau_s = f_\tau(\vartheta)$

Fig. 4. Dependence of the yield strength of the compressible medium on porosity ϑ :

1 – for isostatic compression $p_s^* / \tau_s = f_p(\vartheta)$;

2 – for shear $\tau_s^* / \tau_s = f_\tau(\vartheta)$

Рассмотрим стадию процесса РКУП, в которой осуществляется сжатие заготовки подобно сжатию пористой массы в закрытой пресс-форме. При этом используем результаты работы [31]. Для первого приближения полагаем, что внешним трением можно пренебречь; движение пуансона 2 задано; давление на пуансон опреде-

ляется из уравнения баланса мощностей (2); в начальный момент прессования пористость материала заготовки равна ϑ_b .

Краевые условия в цилиндрической системе координат (r, φ, z) имеют вид: $\sigma_{rz}|_{r=R} = 0$, $R = D/2$; $v_r|_{r=0} = v_r|_{r=R} = 0$, $v_z|_{z=0} = 0$, $v_z|_{z=L_1} = V_1 = dl/dt$. Для данных условий кинематически допустимое поле скоростей $v_r = 0$, $v_z = V_1 z / L_1$; компоненты тензора скорости деформаций $\xi_{ij} = 0$, кроме $\xi_{zz} = -V_1 / L_1$; скорость изменения объема в части I канала пресс-формы $\xi = \xi_{zz}$. Степень деформации сдвига Λ и степень объемной деформации ε имеют вид

$$\Lambda = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{L_b}{L_1} \right), \quad \varepsilon = \ln \left(\frac{L_1}{L_b} \right). \quad (5)$$

Значения относительной пористости ϑ_1 сжимаемой среды в части I канала пресс-формы является функцией перемещения dl рабочего пуансона:

$$\vartheta_1 = 1 - \frac{1 - \vartheta_b}{1 - dl / L_b}. \quad (6)$$

Перемещение инструмента в первой стадии процесса РКУП возможно только при уменьшении объема пор. При этом увеличивается p_s^* и относительная плотность сжимаемой пористой массы.

Зависимость пористости ϑ от нагрузки $\bar{p} = p_z / \tau_s$ пластического течения сжимаемой среды представили следующим образом:

$$\vartheta = (1 + \bar{p}^{3/2})^{-1}. \quad (7)$$

В результате решения уравнений (6) и (7) определили изменение пористости титановой губки и удельного давления в зависимости от перемещения пуансона (рис. 5).

Для вычисления бокового давления на пресс-форму использовали физические уравнения (3) и (4). Формула для расчета бокового давления имеет вид

$$\bar{p}_b = \frac{p_b}{\tau_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} (-1 + \vartheta^{2/3} - 2 \ln \vartheta). \quad (8)$$

Результаты вычисления \bar{p} (ϑ) и \bar{p}_b (ϑ) показаны на рис. 6.

Рассмотрим стадию процесса РКУП, в которой выдавливаемая заготовка в канале пресс-формы перемещается как жестко-пластическое тело. При этом деформация изменения формы и объема пластически сжимаемой среды локализуется в слое интенсивной деформации (слой А–В). Толщина слоя $\Delta h \rightarrow 0$; материал слоя испытывает однородное деформированное состояние, которое в локальной системе координат (n, τ, ζ) можно представить линейными функциями.

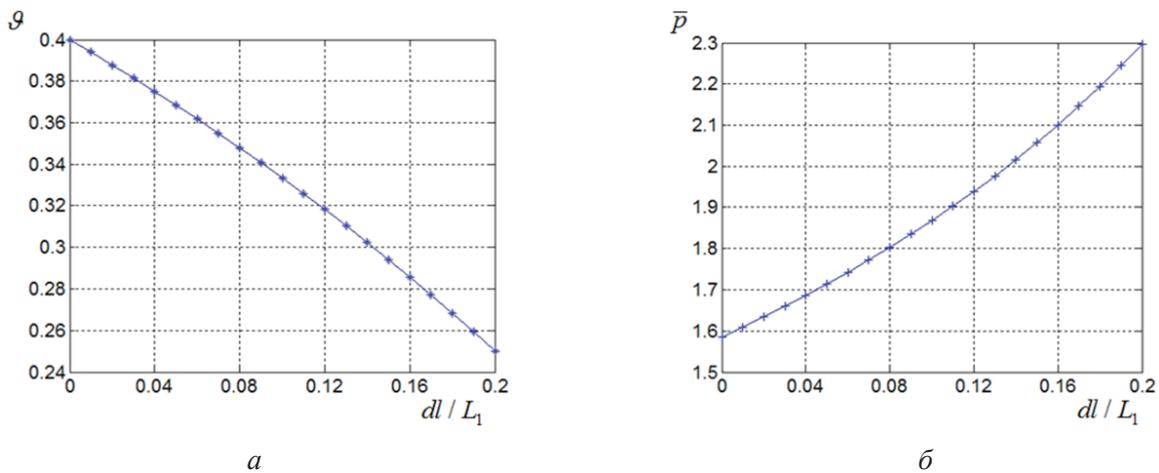


Рис. 5. Изменение пористости ϑ сжимаемой среды (а) и удельного давления \bar{p} (б) на рабочий пуансон при перемещении dl / L_b

Fig. 5. Change in the porosity ϑ of the compressible medium (a) and the specific pressure \bar{p} (b) on the working punch displacement dl / L_b

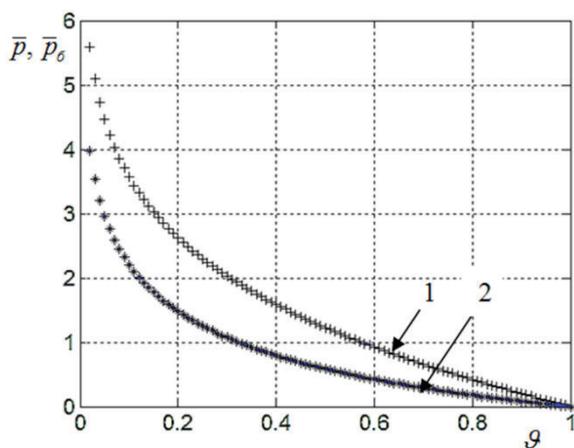


Рис. 6. Зависимость нагрузки пластического течения \bar{p} и бокового давления \bar{p}_b на пресс-форму от пористости ϑ уплотняемой среды:

$$1 - \bar{p}(\vartheta); 2 - \bar{p}_b(\vartheta)$$

Fig. 6. Dependence of the plastic flow load \bar{p} and side pressure \bar{p}_b on the a pressing tool on the porosity ϑ of the compacted medium:

$$1 - \bar{p}(\vartheta); 2 - \bar{p}_b(\vartheta)$$

В соответствии с кинематически допустимой схемой течения пластически сжимаемой среды для слоя А–В, учитывая граничные условия, поле скоростей представили в виде

$$[V^n] = |V_1 - V_2| \sin \alpha, \quad (9)$$

$$[V^\tau] = |V_1 + V_2| \cos \alpha, \quad [V^c] = 0,$$

где $[V^i]$ – скачок вектора скорости перемещения материальных частиц через слой интенсивной деформации.

Скорости V_1^n, V_2^n (рис. 3, б) связаны условием сохранения массы:

$$V_1^n \rho_1 = V_2^n \rho_2; \quad (10)$$

$$V_2 = V_1 \frac{1 - \vartheta_1}{1 - \vartheta_2},$$

где ρ_1, ρ_2 – плотность прессуемого материала в частях II и I канала пресс-формы; ϑ_1, ϑ_2 – пористость сжимаемого материала.

В случае пластически сжимаемой среды в систему уравнений также входит условие неразрывности, которое в [32] проинтегрировано вдоль траектории движения представительного

элемента объема. Из условия сохранения массы (10) следует, что пересечение пластически сжимаемой средой слоя А–В приводит к изменению относительной пористости среды. С учетом условия сохранения массы и условия неразрывности определена плотность выдавливаемого материала из канала пресс-формы:

$$\rho_2 = \rho_1 \exp \frac{2|V_1 - V_2|}{|V_1 + V_2|}. \quad (11)$$

Полагая, что относительная плотность ρ уплотняемого материала известна в результате анализа первой стадии процесса РКУП, вычислили диссипацию мощности слоя интенсивной деформации:

$$W|_{AB} = \lim_{dh \rightarrow 0} (TH + \sigma \xi) S_{AB} dh. \quad (12)$$

Интенсивность скоростей деформации сдвига H и скорость деформации изменения объема ξ слоя А–В определены следующими соотношениями:

$$H = \frac{1}{dh} \left([V^\tau]^2 + \frac{4}{3} [V^n]^2 \right)^{1/2}; \quad \xi = \frac{[V^n]}{dh}.$$

Для определения энергосиловых параметров второй стадии РКУП применили уравнение баланса мощностей (2), в котором величина $W|_{AB}$ вычисляется с использованием соотношения (12). Делением диссипативных функций уравнения баланса мощностей на величины $\tau_s, V_1, \pi D^2 / 4$ уравнение (2) привели к безразмерной форме:

$$\bar{p}_1 = \bar{p}_2 \chi + 4 \left(k_1 \frac{L_1}{D} + k_2 \frac{L_2}{D} \chi \right) +$$

$$+ \left(\sqrt{\frac{4}{3} + \left(\frac{1 + \chi}{1 - \chi} \cot(\alpha) \right)^2} - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 - \rho)}{1 - (1 - \rho)^{2/3}} \right) (1 - \chi); \quad (13)$$

$$k_1 = \frac{\tau_{c1}}{\tau_s}, k_2 = \frac{\tau_{c2}}{\tau_c}; \quad \chi = \frac{V_2}{V_1}.$$

Здесь k_1, k_2 – коэффициенты в законе трения Зибеля; $\chi = \rho_1 / \rho_2$ – параметр, характеризующий уплотнение сжимаемой среды в слое А–В.

Уравнение (13) решается методом последовательных приближений. При этом предполагается, что плотность выдавливаемой заготовки рассчитана для предшествующей стадии исследуемого процесса. Система уравнений (1–13) позволяет от цикла к циклу однозначно прогнозировать комплекс технологических параметров, которые необходимы для анализа и совершенствования процесса РКУП.

Осуществили серию вычислительных экспериментов, целью которых было определить влияние угла α на давление выдавливания \bar{p}_1 и относительную плотность спрессованной заготовки.

Вычисления выполнили для следующих исходных данных: $\vartheta_b = 0,4$; $L_1 / D = 4$, $L_2 / D = 2$; $k_1 = k_2 = 0,2$; $\chi = 0,8$; $\pi / 16 \leq \alpha \leq \pi / 2$. Значения плотности ρ и пористости ϑ пластически сжимаемой заготовки при варьировании удельных давлений \bar{p}_1 на рабочий пуансон определены с использованием формул (4) и (6). В результате определили зависимость давления прессования $\bar{p}_1(\alpha)$ и пористости $\vartheta(\alpha)$ заготовки от угла α (рис. 7).

Численное моделирование процесса РКУП требует применения модели пластического течения пористого материала, включенной в программное обеспечение современных САПР. Результаты моделирования существенно зависят как от выбора самой модели материала, так и от методов ее идентификации. В настоящей работе

для описания реологического поведения пористого материала использована модель пластичности пористого металла Гурсона (Gurson) [33]. Особенностью этой модели, реализованной в программном комплексе конечно-элементного анализа Simulia / Abaqus, является возможность описания процессов как уплотнения, так и разуплотнения порошковых материалов в широком диапазоне изменения напряженно-деформированного состояния. В данном случае такая постановка задачи позволяет определить области деформируемой пористой заготовки с высоким уровнем растягивающих напряжений в процессе РКУП, а следовательно, потенциально опасные для образования поверхностных трещин и разрушения материала. Ниже показано применение методики идентификации модели пластического течения пористой заготовки из титановой губки.

Имитационное моделирование процесса РКУП выполнили методом конечных элементов. Решение задачи осуществлялось в объемной постановке, но использовалась половина сечения в силу симметрии. Для моделирования применялся расчетный модуль Explicit CAE-системы Abaqus. Использовалась модель пластичности пористого металла, основанная на теории пластичности пористого металла Гурсона (Gurson). Начальная относительная плотность составляла 0,6, инструмент задавался как абсолютно жесткий. Контактное взаимодействие между заготовкой и инструментом описывалось условием трения Амантона – Кулона, коэффициент трения $\mu = 0,1$. Принято допущение, что на поверхно-

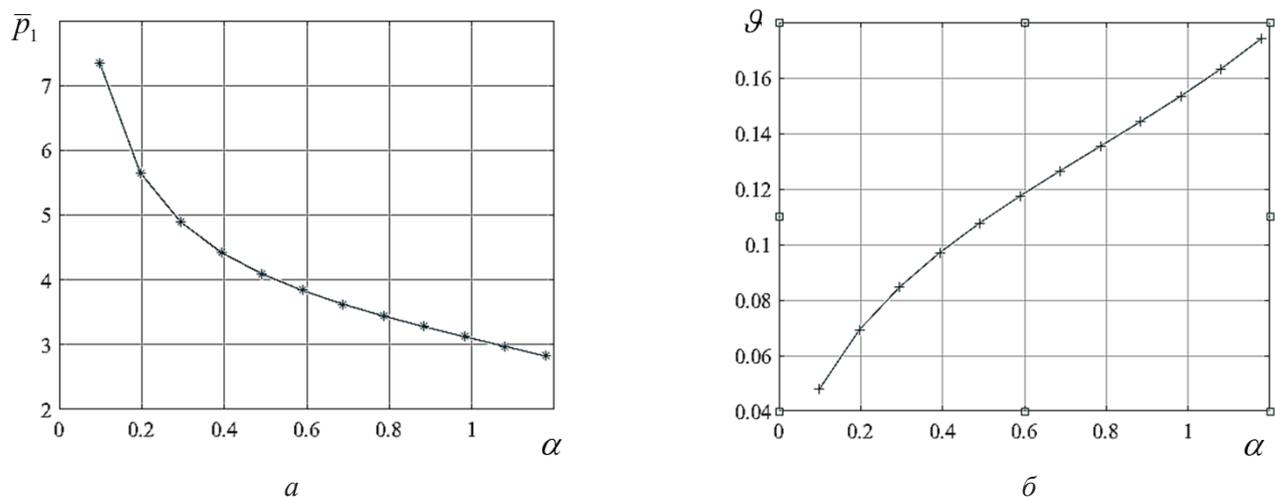


Рис. 7. Зависимости давления $\bar{p}_1(\alpha)$ прессования и пористости $\vartheta(\alpha)$ заготовки от угла α

Fig. 7. The dependence of the pressing pressure $\bar{p}_1(\alpha)$ and porosity of the workpiece $\vartheta(\alpha)$ on the angle α

сти контакта заготовки и инструмента касательные напряжения ограничены $\tau_S = 30$ МПа .

Моделирование с использованием метода конечных элементов позволяет оценивать множество параметров. При решении задачи в данном случае ограничились анализом распределения интенсивности напряжений σ_i и относительной пористости , которые представлены на рис. 8 и 9.

На рис. 8 показано распределение интенсивности напряжений в тонком слое, расположенном в окрестности сечения и разделяющем входную I и выходную II части канала пресс-формы. Видно, что наибольший уровень напряжений возникает в процессе равноканального углового прессования при $\alpha = 45^\circ$. Соотношение максимальных значений интенсивности напряжений между схемами РКУП с углами 45 и 60° составляет 1,57.

Распределение относительной плотности по сечению наиболее равномерно в случае, когда угол $\alpha = 45^\circ$ (рис. 9, а). При $\alpha = 50^\circ$ пористость присутствует только в концевой части заготовки, даже несмотря на противодействие. В остальных случаях происходит разуплотнение в контактной зоне заготовки с поверхностью канала пресс-формы. При этом увеличение значения

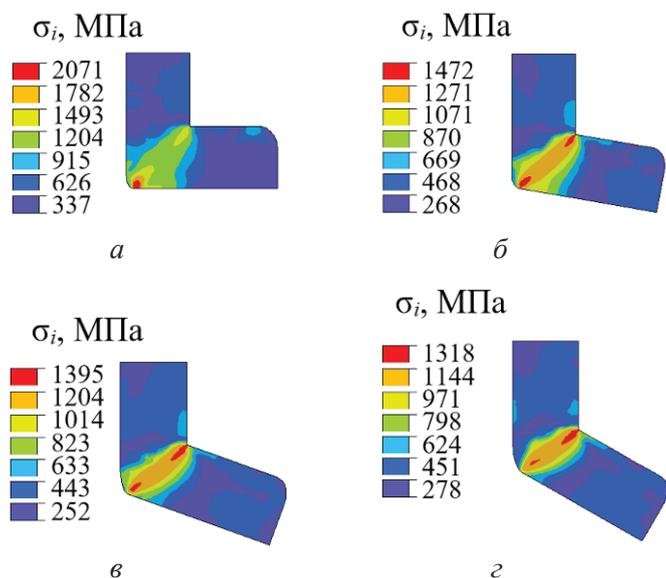


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений σ_i на установившейся стадии процесса:

$a - \alpha = 45^\circ ; б - \alpha = 50^\circ ; в - \alpha = 55^\circ ; г - \alpha = 60^\circ$

Fig. 8. The distribution of the yield stress σ_i at the steady stage of the process:

$a - \alpha = 45^\circ ; б - \alpha = 50^\circ ; в - \alpha = 55^\circ ; г - \alpha = 60^\circ$

относительной пористости ϑ не превышает 0,05. Присутствует также значительная неоднородность в концевой области заготовок.

График изменения давления на рабочий пуансон приведен на рис. 10.

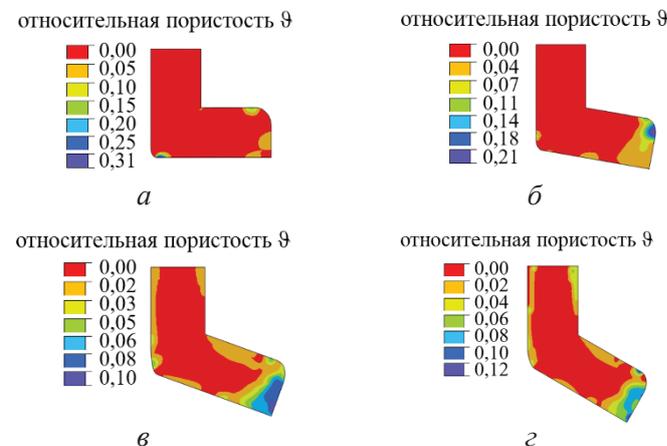


Рис. 9. Распределение относительной пористости ϑ на установившейся стадии процесса:

$a - \alpha = 45^\circ ; б - \alpha = 50^\circ ; в - \alpha = 55^\circ ; г - \alpha = 60^\circ$

Fig. 9. Distribution of relative porosity ϑ at the steady stage of the process:

$a - \alpha = 45^\circ ; б - \alpha = 50^\circ ; в - \alpha = 55^\circ ; г - \alpha = 60^\circ$

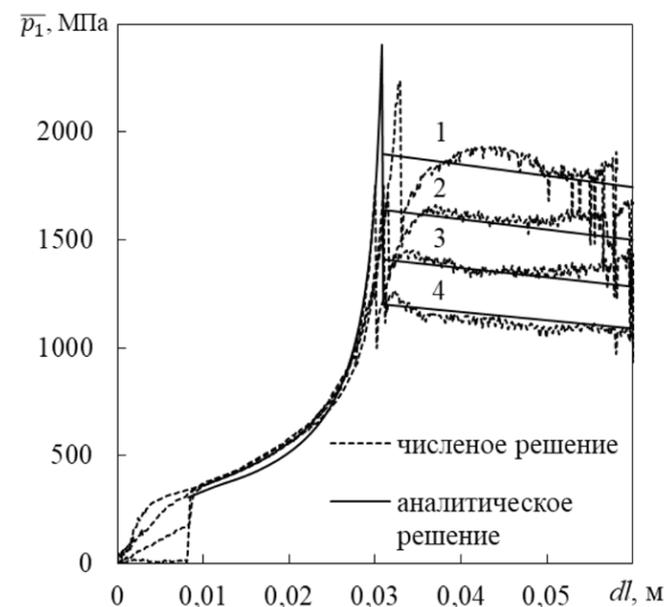


Рис. 10. График изменения давления на рабочий пуансон \bar{p}_1 при перемещении dl :

$1 - \alpha = 45^\circ ; 2 - \alpha = 50^\circ ; 3 - \alpha = 55^\circ ; 4 - \alpha = 60^\circ$

Fig. 10. The dependence of the pressing force \bar{p}_1 on the movement dl of the punch:

$1 - \alpha = 45^\circ ; 2 - \alpha = 50^\circ ; 3 - \alpha = 55^\circ ; 4 - \alpha = 60^\circ$

Аналитические вычисления выполнены в соответствии с результатами математической модели, а результаты численного решения были получены при компьютерном моделировании с использованием метода конечных элементов. На рис. 10 видна удовлетворительная сходимость результатов решений. График показывает изменение давления прессования на основных стадиях процесса. При переходе от начальной стадии процесса РКУП к завершающей давление прессования принимает максимальное значение [34, 35]. При увеличении угла α максимальное значение давления на рабочий пуансон уменьшается. Рациональные технологические параметры прессования пористых заготовок должны обеспечивать максимально допустимые давления на деформирующий инструмент. Согласно этому условию в каждом конкретном процессе РКУП определяется оптимальное значение угла 2α .

Выводы

Для оптимизации технологических процессов изготовления заготовок и изделий из порошковых и пористых материалов разработана достаточно надежная и простая для практического использования математическая модель процесса полунепрерывного равноканального углового прессования пластически сжимаемой среды. В качестве модельного материала исходных заготовок для реализации рассматриваемого процесса приняты свойства материала пористых брикетов, изготовленных компактированием титановой губки в закрытой пресс-форме. Рассмотрены основные стадии РКУП: начальная стадия процесса, в которой пористый деформируемый материал испытывает сжатие в закрытой пресс-форме; стадия, характеризующаяся интенсивной пластической деформацией, локализованной при изменении угла канала пресс-формы; завершающая стадия, в которой деформируемый материал сжат до практически компактного состояния и истекает из канала пресс-формы как сплошное тело. Математическая модель позволяет определить энергосиловые параметры процесса РКУП. Помимо аналитического решения приведено конечно-элементное моделирование РКУП пористого материала для более детального прогнозирования пористости по сечению заготовки. Показано удовлетворительное соответствие

результатов расчета энергосиловых параметров процесса. Возможность описания процессов как уплотнения, так и разуплотнения материалов на макроуровне в широком диапазоне объемной пластической деформации позволит более точно определять области деформируемой пористой заготовки, подверженные высоким растягивающим напряжениям в процессе РКУП и являющиеся потенциально опасными с точки зрения образования поверхностных трещин и разрушения материала.

Список литературы

1. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, G.V. Nurislamova, B.K. Kim, M.D. Baro, J.A. Szpunar, T.G. Langdon // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51, iss. 3. – P. 753–765. – DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00466-4.
2. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll-bonding (ARB) process / Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai // *Acta Materialia*. – 1999. – Vol. 47, iss. 2. – P. 579–583. – DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6.
3. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing / S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeyeva, O.R. Valikhmetova, S.Yu. Mironova, S.L. Semiatin // *Scripta Materialia*. – 2004. – Vol. 51. – P. 1147–1151. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.08.018.
4. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression / M. Richert, H.P. Stuwe, M.J. Zehetbauer, J. Richert, R. Pippan, Ch. Motz, E. Schafner // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 355, iss. 1–2. – P. 180–185. – DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00046-7.
5. *Mani B., Jahedi M., Paydar M.H.* Consolidation of commercial pure aluminum powder by torsional-equal channel angular pressing (T-ECAP) at room temperature // *Powder Technology*. – 2012. – Vol. 219. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.powtec.2011.11.034.
6. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation / R.Z. Valiev, Yu. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu // *JOM*. – 2006. – Vol. 58. – P. 33–39. – DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7.
7. *Segal V.* Review: modes and processes of severe plastic deformation (SPD) // *Materials*. – 2018. – Vol. 11 (7). – P. 1175. – DOI: 10.3390/ma11071175.
8. *William G., Voorckes J.* Conform and Linex – continuous aluminium extrusion machines // *Light Metal Age*. – 1978. – Vol. 36, iss. 1–2. – P. 18–20.

9. *Thomas B.M., Derguti F., Jackson M.* Continuous extrusion of a commercially pure titanium powder via the Conform process // *Materials Science and Technology*. – 2017. – Vol. 33, iss. 7. – P. 899–903. – DOI: 10.1080/02670836.2016.1245256.
10. *Segal V.M.* Mechanics of continuous equal-channel angular extrusion // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210. – P. 542–549. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.11.001.
11. *Lapovok R., Tomus D., Bettles C.* Shear deformation with imposed hydrostatic pressure for enhanced compaction of powder // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 58, iss. 10. – P. 898–901. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.01.010.
12. Ultrafine-grained porous titanium and porous titanium/magnesium composites fabricated by space holder-enabled severe plastic deformation / Y. Qi, K.G. Contreras, H.D. Jung, H.E. Kim, R. Lapovok, Y. Estrin // *Materials Science and Engineering: C*. – 2016. – Vol. 59. – P. 754–765. – DOI: 10.1016/j.msec.2015.10.070.
13. Microstructural characteristics and superplastic-like behavior in aluminum powder alloy consolidated by equal-channel angular pressing / K. Matsuki, T. Aida, T. Takeuchi, J. Kusui, K. Yokoe // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, iss. 10. – P. 2625–2632. – DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00061-6.
14. *Xia K., Wu X.* Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles // *Scripta Materialia*. – 2005. – Vol. 53, iss. 11. – P. 1225–1229. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.012.
15. Cold compaction study of Armstrong Process® Ti–6Al–4V powders / W. Chen, Y. Yamamoto, W.H. Peter, S.B. Gorti, A.S. Sabau, M.B. Clark, S.D. Nunn, J.O. Kiggins, C.A. Blue, J.C. Williams, B. Fuller, K. Akhtar // *Powder Technology*. – 2011. – Vol. 212, iss. 2. – P. 194–199. – DOI: 10.1016/j.powtec.2011.08.007.
16. *Crowley G.* How to extract low-cost titanium // *Advanced Materials and Processes*. – 2003. – Vol. 161, iss. 11. – P. 25–27.
17. *Chen G.Z., Fray D.J., Farthing T.W.* Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride // *Nature*. – 2000. – Vol. 407. – P. 361–364. – DOI: 10.1038/35030069.
18. *Donaldson A., Cordes R.A.* Rapid plasma quenching for the production of ultrafine metal and ceramic powders // *JOM*. – 2005. – Vol. 57, iss. 4. – P. 58–63. – DOI: 10.1007/s11837-005-0083-4.
19. Obtaining of titanium powder from titanium sponge by self-propagating high-temperature synthesis hydration and dehydration / V.I. Ratnikov, V.K. Prokudina, A.F. Belikova, N.V. Sachkova // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2010. – Vol. 51, iss. 4. – P. 352–358. – DOI: 10.3103/S1067821210040176.
20. *Bukhvalov A.B., Gorshkov M.M., Litvinov B.V.* Effect of hydrogenation and hot-cold rolling of compact from titanium sponge on its structure, strain hardening, and fracture behavior // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2004. – Vol. 46, iss. 11–12. – P. 527–534. – DOI: 10.1007/s11041-005-0013-7.
21. Porous material based on spongy titanium granules: structure, mechanical properties, and osseointegration / A.P. Rubshtein, I.Sh. Trakhtenberg, E.B. Makarova, E.B. Triphonova, D.G. Bliznets, L.I. Yakovenkova, A.B. Vladimirov // *Materials Science and Engineering: C*. – 2014. – Vol. 35. – P. 363–369. – DOI: 10.1016/j.msec.2013.11.020.
22. Analysis of compressibility behavior and development of a plastic yield model for uniaxial die compaction of sponge titanium powder / A. Hadadzadeh, M.A. Whitney, M.A. Wells, S.F. Corbin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 243. – P. 92–99. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.004.
23. Влияние температуры на компактируемость брикетов из титановой губки, легированной водородом / А.В. Нестеренко, В.И. Новожинов, А.Г. Залазинский, А.В. Скрипов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – № 2. – С. 52–57. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-2-52-57.
24. *Нестеренко А.В., Новожинов В.И., Вичужанин Д.И.* Влияние деформационной обработки на свойства и структуру полуфабрикатов, полученных твердофазной консолидацией титановой губки // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – № 4. – С. 42–47. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-4-42-47.
25. *Нестеренко А.В., Новожинов В.И., Залазинский А.Г.* Влияние деформационной обработки на свойства и структуру титана, полученного пластической деформацией титановой губки легированной водородом // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 3. – P. 98–108. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.098-108.
26. Патент № 2686436 Российская Федерацияна: № 2018132622: заявл. 12.09.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 12. Пресс-форма для двухстороннего пресования порошка / Березин И.М., Залазинский А.Г.
27. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
28. *Колмогоров В.Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
29. *Друянов Б.А.* Прикладная теория пластичности пористых тел. – М.: Машиностроение, 1989. – 165 с.
30. *Залазинский А.Г., Колмыков В.Л., Соколов М.В.* О физических уравнениях пористого материала // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 1997. – № 4. – С. 39–43.

31. *Залазинский А.Г.* Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2000. – 492 с.

32. *Залазинский А.Г., Поляков А.П.* Построение разрывного решения для процесса выдавливания пластически сжимаемого тела // Известия вузов. Машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 43–53.

33. *Gurson A.L.* Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Pt. I. Yield criteria and flow rules for porous ductile materials // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1977. – Vol. 99. – P. 2–15.

34. Effect of acute tool-angles on equal channel angular extrusion/pressing / A.V. Nagasekhar, Y. Tick-Hon, S. Li, H.P. Seow // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 410–411. – P. 269–272. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.043.

35. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion / S. Li, M.A.M. Bourke, I.J. Beyerlein, D.J. Alexander, B. Clausen // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 382, iss. 1–2. – P. 217–236. – DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.067.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Analytical model of equal-channel angular pressing of titanium sponge

Ivan Berezin^{1, 2 a, *}, Alexander Zalazinsky^{3, b}, Denis Kryuchkov^{3, c*}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² GUIDE SYSTEMS LLC, 18b Rodonitova str., Ekaterinburg, 620089, Russian Federation

³ Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Science, 34 Komsomolskaya str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8674-3352>,  i.m.berezin@urfu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8352-5475>,  zalaz@list.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8585-3544>,  kru4koff@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 February 2023

Revised: 29 March 2023

Accepted: 28 April 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Model
Equal-channel angular pressing
Titanium sponge
FEM

Funding

The work was financed by the State budget. A theme No. 0391-2019-0005 “Development of scientific bases of designing of optimum production engineering plastic forming of metal materials with the secured level of a continuity and physicomechanical properties”.

Acknowledgements

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

For citation: Berezin I.M., Zalazinsky A.G., Kryuchkov D.I. Analytical model of equal-channel angular pressing of titanium sponge. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 17–31. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-17-31. (In Russian).

ABSTRACT

Introduction. The use of equal-channel angular pressing (*ECAP*) of metal powder makes it possible to obtain practically non-porous blanks with high hardness, with a high level of accumulated deformation and with the formation of an ultra-fine-grained structure. A relevant issue for the study of the semi-continuous *ECAP* process remains a reliable assessment of the energy-power parameters of the process and the prediction of the porosity of compressed materials. This, in turn, is due to the need to develop sufficiently accurate, reliable and simple mathematical models for practical application. **The purpose of the work** is to develop an analytical model of the process of equal-channel angular pressing of porous material. Powdered screening of spongy titanium of the *TG-100* brand was selected as a model of the material for the study. The object of the study is the process of semi-continuous equal-channel angular pressing of axisymmetric porous briquette of titanium sponge in the channel of the mold. It is assumed that the *ECAP* uses a punch to create back pressure. For the solution, a process scheme, a statically permissible load scheme on a layer of intense deformation and a kinematically permissible flow scheme of a plastically compressible medium in a layer **are determined**. A system of equations is constructed in accordance with the accepted schemes. The equation power balance is applied. The analytical equation is solved by the method of successive approximations. Finite element simulation of the porous titanium *ECAP* process was carried out at the angles of intersection of the mold channels at 45°, 50°, 55° and 60°. **Results and Discussion.** The porosity of the blank is determined at different stages of the *ECAP* process. A diagram of the change in pressure on the punch using the analytical solution and finite element simulation is obtained. It is revealed that the results of the analytical solution are consistent with the data of the finite element simulation. The highest stress level occurs in the process of equal-channel angular pressing at $\alpha = 45^\circ$, however, the distribution of relative density over the cross section is most uniform. The maximum value of the pressure on the working punch decreases with an increase in the angle α . Rational technological parameters of pressing porous blanks should provide the maximum permissible pressure on the deforming tool. From this condition, in each specific *ECAP* process, it is possible to determine the optimal angle value from the analytical solution.

References

1. Zhilyaev A.P., Nurislamova G.V., Kim B.K., Baro M.D., Szpunar J.A., Langdon T.G. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 3, pp. 753–765. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00466-4.

* Corresponding author

Kryuchkov Denis I., Ph.D. (Engineering), Researcher
 Institute of Engineering Science,
 Ural Branch of the Russian Academy of Science,
 34 Komsomolskaya str.,
 620049, Ekaterinburg, Russian Federation
 Tel.: 8 (343) 374-50-51, e-mail: kru4koff@bk.ru

2. Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*, 1999, vol. 47, iss. 2, pp. 579–583. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6.
3. Zherebtsov S.V., Salishchev G.A., Galeyeva R.M., Valiakhmetova O.R., Mironova S.Yu., Semiatin S.L. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 51, pp. 1147–1151. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.08.018.
4. Richert M., Stuwe H.P., Zehetbauer M.J., Richert J., Pippan R., Motz Ch., Schafner E. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 355, iss. 1–2, pp. 180–185. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00046-7.
5. Mani B., Jahedi M., Paydar M.H. Consolidation of commercial pure aluminum powder by torsional-equal channel angular pressing (T-ECAP) at room temperature. *Powder Technology*, 2012, vol. 219, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.11.034.
6. Valiev R.Z., Estrin Yu., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*, 2006, vol. 58, pp. 33–39. DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7.
7. Segal V. Review: modes and processes of severe plastic deformation (SPD). *Materials*, 2018, vol. 11 (7), p. 1175. DOI: 10.3390/ma11071175.
8. William G., Voorke J. Conform and Linex – continuous aluminium extrusion machines. *Light Metal Age*, 1978, vol. 36, iss. 1–2, pp. 18–20.
9. Thomas B.M., Derguti F., Jackson M. Continuous extrusion of a commercially pure titanium powder via the Conform process. *Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33, iss. 7, pp. 899–903. DOI: 10.1080/02670836.2016.1245256.
10. Segal V.M. Mechanics of continuous equal-channel angular extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, pp. 542–549. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.11.001.
11. Lapovok R., Tomus D., Bettles C. Shear deformation with imposed hydrostatic pressure for enhanced compaction of powder. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 58, iss. 10, pp. 898–901. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.01.010.
12. Qi Y., Contreras K.G., Jung H.D., Kim H.E., Lapovok R., Estrin Y. Ultrafine-grained porous titanium and porous titanium/magnesium composites fabricated by space holder-enabled severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, vol. 59, pp. 754–765. DOI: 10.1016/j.msec.2015.10.070.
13. Matsuki K., Aida T., Takeuchi T., Kusui J., Yokoe K. Microstructural characteristics and superplastic-like behavior in aluminum powder alloy consolidated by equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 10, pp. 2625–2632. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00061-6.
14. Xia K., Wu X. Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 53, iss. 11, pp. 1225–1229. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.012.
15. Chen W., Yamamoto Y., Peter W.H., Gorti S.B., Sabau A.S., Clark M.B., Nunn S.D., Kiggans J.O., Blue C.A., Williams J.C., Fuller B., Akhtar K. Cold compaction study of Armstrong Process® Ti–6Al–4V powders. *Powder Technology*, 2011, vol. 212, iss. 2, pp. 194–199. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.08.007.
16. Crowley G. How to extract low-cost titanium. *Advanced Materials and Processes*, 2003, vol. 161, iss. 11, pp. 25–27.
17. Chen G.Z., Fray D.J., Farthing T.W. Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride. *Nature*, 2000, vol. 407, pp. 361–364. DOI: 10.1038/35030069.
18. Donaldson A., Cordes R.A. Rapid plasma quenching for the production of ultrafine metal and ceramic powders. *JOM*, 2005, vol. 57, iss. 4, pp. 58–63. DOI: 10.1007/s11837-005-0083-4.
19. Ratnikov V.I., Prokudina V.K., Belikova A.F., Sachkova N.V. Obtaining of titanium powder from titanium sponge by self-propagating high-temperature synthesis hydration and dehydration. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2010, vol. 51, iss. 4, pp. 352–358. DOI: 10.3103/S1067821210040176.
20. Bukhvalov A.B., Gorshkov M.M., Litvinov B.V. Effect of hydrogenation and hot-cold rolling of compact from titanium sponge on its structure, strain hardening, and fracture behavior. *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, vol. 46, iss. 11–12, pp. 527–534. DOI: 10.1007/s11041-005-0013-7.
21. Rubshtein A.P., Trakhtenberg I.Sh., Makarova E.B., Triphonova E.B., Bliznets D.G., Yakovenkova L.I., Vladimirov A.B. Porous material based on spongy titanium granules: structure, mechanical properties, and osseo-integration. *Materials Science and Engineering: C*, 2014, vol. 35, pp. 363–369. DOI: 10.1016/j.msec.2013.11.020.
22. Hadadzadeh A., Whitney M.A., Wells M.A., Corbin S.F. Analysis of compressibility behavior and development of a plastic yield model for uniaxial die compaction of sponge titanium powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 243, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.004.

23. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinskii A.G., Skripov A.V. Vliyanie temperatury na kompaktnost' briкетов iz titanovoi gubki, legirovannoi vodorodom [Influence of temperature on compactibility of briquettes of titanium sponge alloyed with hydrogen]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2015, no. 2, pp. 52–57. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-2-52-57.

24. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Vichuzhanin D.I. Vliyanie deformatsionnoi obrabotki na svoistva i strukturu polufabrikatov, poluchennykh tverdofaznoi konsolidatsiei titanovoi gubki [Influence of deformation treatment on the properties and structure of semi-finished products by solid-phase consolidation of titanium sponge]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2015, no. 4, pp. 42–47. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-4-42-47.

25. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinsky A.G. Effect of deformation processing on the properties and structure of titanium obtained by plastic deformation of hydrogen-alloyed titanium sponge. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 3, pp. 98–108. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.098-108. (In Russian).

26. Berezin I.M., Zalazinskij A.G. *Press-forma dlya dvukhstoronnego pressovaniya poroshka* [Mold for double-sided pressing of powder]. Patent RF, no. 2686436, 2019.

27. Mitin B.S., ed. *Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 792 p.

28. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya. Deformatsii. Razrushenie* [Stresses. Deformations. Destruction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 229 p.

29. Druyanov B.A. *Prikladnaya teoriya plastichnosti poristykh tel* [Applied theory of plasticity of porous bodies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 165 p.

30. Zalazinsky A.G., Kolmykov V.L., Sokolov M.V. O fizicheskikh uravneniyakh poristogo materiala [On the physical equations of a porous material]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 1997, no. 4, pp. 39–43.

31. Zalazinsky A.G. *Plasticheskoe deformirovanie strukturno-neodnorodnykh materialov* [Plastic deformation of structurally inhomogeneous materials]. Yekaterinburg, IES UB RAS Publ., 2000. 492 p.

32. Zalazinsky A.G., Polyakov A.P. Postroenie razryvnogo resheniya dlya protsessa vydavlivaniya plasticheskogo tela [Construction of a discontinuous solution for the process of extrusion of a plastically compressible body]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2001, no. 4, pp. 43–53.

33. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Pt. I. Yield criteria and flow rules for porous ductile materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, vol. 99, pp. 2–15.

34. Nagasekhar A.V., Tick-Hon Y., Li S., Seow H.P. Effect of acute tool-angles on equal channel angular extrusion/pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 410–411, pp. 269–272. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.043.

35. Li S., Bourke M.A.M., Beyerlein I.J., Alexander D.J., Clausen B. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 382, iss. 1–2, pp. 217–236. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.067.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Теоретическое исследование кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами

Вадим Куц^{а, *}, Сергей Чевычелов^б

Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>, kuc-vadim@yandex.ru, ^б <https://orcid.org/0009-0006-8958-2191>, tschsa@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914

История статьи:

Поступила: 13 марта 2023
Рецензирование: 29 марта 2023
Принята к печати: 15 апреля 2023
Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Метод обката
Сборная фреза
Косоугольное фрезерование
Кривизна поверхности
Главные радиусы кривизны

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Ведение. В статье рассматриваются методы обработки крупных деталей, имеющих криволинейные выпуклые поверхности с прямолинейной направляющей, на многокоординатных обрабатывающих центрах с ЧПУ по методу касания с дискретным движением подачи инструмента вдоль профиля детали. Показано, что основным недостатком данного метода является более низкая производительность, что связано с наличием дискретного перемещения инструмента между циклами его возвратно-поступательных движений, где величина дискретного перемещения инструмента при заданной точности обработки зависит от величины кривизны обрабатываемой поверхности. Для повышения производительности обработки предлагается использовать сборные дисковые фрезы, оснащённые сменными многогранными пластинами с прямолинейными режущими кромками. Их установка в корпусе фрезы с отличными от нуля углами наклона главной режущей кромки в сочетании с дополнительным поворотом фрезы при обработке вдоль направления поступательного движения подачи позволяет получать вогнутую поверхность и обеспечить более плотное прилегание производящей поверхности инструмента и обработанной поверхности детали. **Целью работы** является снижение погрешности аппроксимации профиля обрабатываемой детали при её обработке по методу касания с дискретным движением сборных дисковых фрез вдоль профиля и обеспечение вследствие этого возможности увеличения шага перемещения инструмента вдоль формируемого профиля для повышения производительности обработки. **Метод исследования:** геометрическая теория проектирования металлорежущих инструментов. **Результаты и обсуждение.** Установленные в работе закономерности позволили создать метод определения угла наклона главной режущей кромки СМП фрезы и углов поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи при построчной обработке протяженных участков деталей с криволинейным профилем на многокоординатных станках с ЧПУ. Это позволяет за счет поворота фрезы обеспечить наилучшее прилегание ее производящей поверхности к обработанной поверхности в точке их контакта, а также обеспечить снижение погрешности аппроксимации обрабатываемого профиля и повысить производительность обработки за счет возможности увеличения шага перемещения инструмента.

Для цитирования: Куц В.В., Чевычелов С.А. Теоретическое исследование кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 32–44. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-32-44.

Введение

Обработка крупных деталей, имеющих криволинейные выпуклые поверхности с прямолинейной направляющей, в настоящее время в условиях единичного, мелкосерийного и ремонтного производства осуществляется на многокоординатных обрабатывающих центрах

с ЧПУ ввиду экономической нецелесообразности применения специального оборудования. При этом формирование поверхности детали может выполняться по методу касания с непрерывным движением подачи инструмента вдоль профиля детали (рис. 1, а) или с дискретным движением инструмента (рис. 1, б).

В частности, при фрезеровании деталей с толщиной меньше высоты фрезы обработка может выполняться по методу касания с непрерывным движением подачи инструмента вдоль профиля детали (см. рис. 1, а). При фрезеровании деталей с большой толщиной может применяться метод

*Адрес для переписки

Куц Вадим Васильевич, д.т.н., доцент
Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, 94,
305040, г. Курск, Россия
Тел.: 8 (903) 639-94-01, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

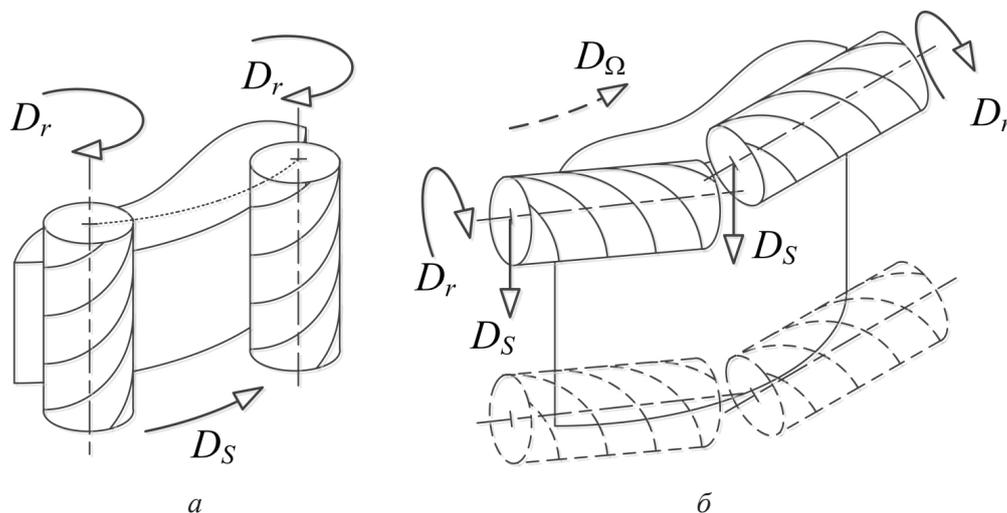


Рис. 1. Формирование поверхности детали методом касания с движением подачи инструмента:

a – непрерывным; b – дискретным

Fig. 1. The formation of the surface of the part by the touch method with the feed movement of the tool:

a – continuous; b – discrete

касания с дискретным движением подачи вдоль профиля детали (см. рис. 1, b), где фреза осуществляет циклические возвратно-поступательные движения подачи перпендикулярно профилю детали и смещается при каждом цикле вдоль профиля детали на заданную дискретную величину, зависящую от требуемой точности обработки. Примером таких деталей могут служить прямозубые крупномодульные зубчатые колёса с величинами модуля больше 9 мм и шириной зубчатого венца больше 50 мм, для которых обработка по первому методу будет затруднена.

Обработка деталей по методу касания с непрерывным движением подачи инструмента вдоль профиля детали получила широкое распространение, существует большое количество работ, посвященных этому вопросу [1–6]. Однако вопросы обработки по методу касания с дискретным движением подачи вдоль профиля детали ввиду меньшей распространённости профильных деталей с большой толщиной менее изучены [7–10]. Основным недостатком этого способа является более низкая производительность, что связано с наличием дискретного перемещения инструмента между циклами возвратно-поступательных движений, при этом величина дискретного перемещения инструмента Δ_Ω при заданной точности обработки зависит от величины кривизны обрабатываемой поверхно-

сти (рис. 2), что приводит к уменьшению производительности обработки.

Для повышения производительности обработки в этом случае целесообразно применять фрезы, имеющие вогнутую форму производящей поверхности, которая обеспечивает более плотное ее прилегание к обрабатываемой поверхности. Под производящей поверхностью понимается поверхность, образованная формообразующей режущей кромкой фрезы в результате осуществления ею главного движения, т. е. движения, определяющего скорость резания [11].

Однако применительно к конструкциям сборных дисковых или торцевых фрез, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП), можно констатировать, что отсутствуют СМП стандартной конструкции с вогнутой режущей кромкой. В работах [12–16] было установлено, что при вращении фрезы с установленной в корпусе СМП с прямолинейной режущей кромкой под углом наклона главной режущей кромки, отличным от нуля ($\lambda \neq 0$), производящая поверхность приобретает вогнутую форму, и с увеличением угла λ кривизна этой поверхности увеличивается. В работах [15, 16] также показывается, что кривизну производящей поверхности таких фрез можно повысить, повернув фрезу вдоль направления поступательного движения

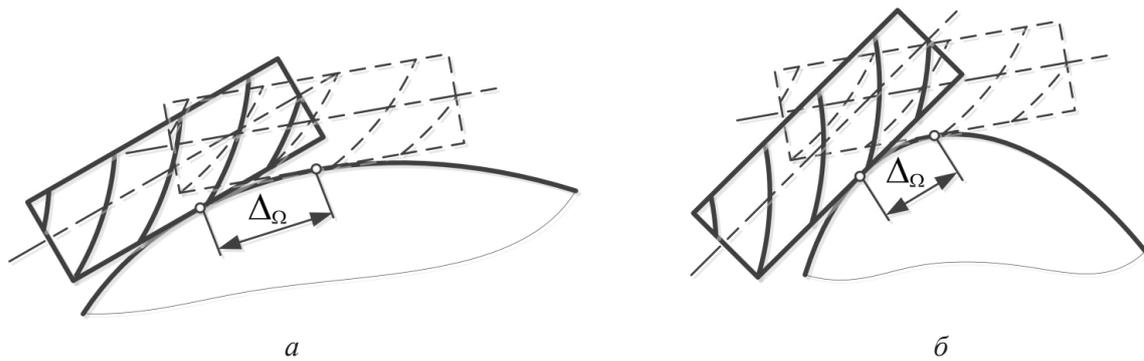


Рис. 2. Зависимость величины дискретного перемещения инструмента от кривизны профиля обрабатываемой поверхности:

a – при малой кривизне; *б* – при высокой кривизне

Fig. 2. The dependence of the value of the discrete tool movement on the curvature of the profile of the surface being processed:

a – at low curvature; *б* – at high curvature

подачи на величину угла ξ (реализовав схему косоугольного фрезерования), для чего предполагается использовать 5-координатные обрабатывающие центры. Таким образом, целесообразно разработать конструкцию фрезы с подбором угла наклона главной режущей кромки СМП, при котором будет обеспечено равенство кривизны производящей поверхности и наименьшей кривизны профиля выпуклой обрабатываемой поверхности, и путем поворота фрезы при фрезеровании на рассчитанный угол ξ обеспечивать это равенство вдоль всего профиля. Реализация такого подхода требует исследования влияния параметров фрезы (диаметра, угла наклона главной режущей кромки) и угла наклона фрезы вдоль направления поступательного движения подачи ξ на изменение кривизны обработанной поверхности (главных радиусов кривизны).

Из вышесказанного можно сформулировать **цель данного исследования** как снижение погрешности аппроксимации профиля обрабатываемой детали при ее обработке по методу касания с дискретным движением сборных дисковых или концевых фрез вдоль профиля и обеспечение вследствие этого возможности увеличения шага перемещения инструмента вдоль формируемого профиля для повышения производительности обработки.

Задачей является выполнение теоретического исследования изменения кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами, оснащенными СМП,

а также создание метода определения угла наклона главной режущей кромки СМП фрезы и углов поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи, обеспечивающих наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы и поверхности детали в точках их контакта.

Методика исследований

Выполним построение модели сборной фрезы номинальным диаметром d , состоящей из одной СМП, установленной в корпусе фрезы с главным углом в плане φ и углом наклона главной режущей кромки λ (рис. 3).

Уравнение режущей кромки СМП, определяющее производящую поверхность исследуемой фрезы, опишем в собственной системе координат $(X_1 Y_1 Z_1)$:

$$\bar{r}_1(t) = [t \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (1)$$

где t – параметр длины режущей кромки СМП.

Уравнение режущей кромки СМП (1) последовательно преобразуем в систему координат корпуса фрезы $(X_4 Y_4 Z_4)$ с учетом заданного главного угла в плане (см. рис. 3, поз. 1), угла наклона главной режущей кромки (см. рис. 3, поз. 2) и диаметра фрезы (рис. 3, поз. 3)

$$\begin{aligned} \bar{r}_4(t) = & A_{43}^{\{2\}}(d/2) \cdot A_{32}^{\{5\}}(\lambda) \times \\ & \times A_{21}^{\{6\}}(\pi/2 - \varphi) \cdot \bar{r}_1(t), \end{aligned} \quad (2)$$

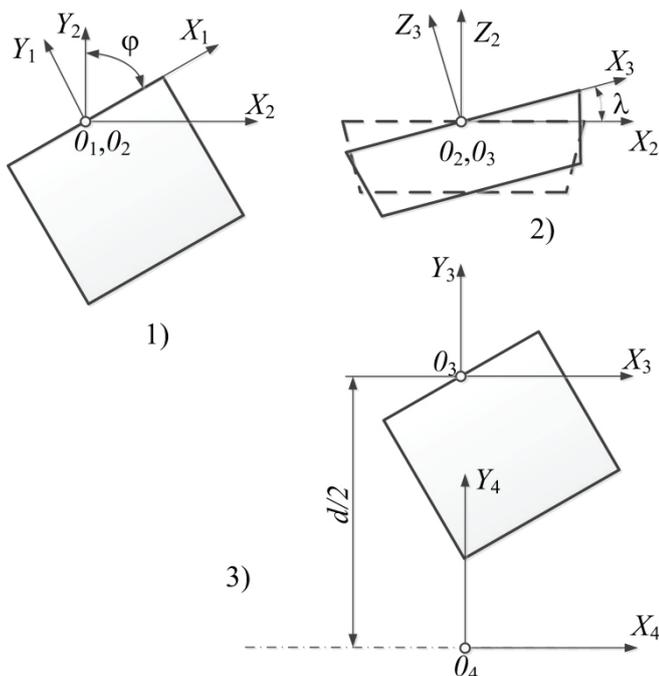


Рис. 3. Схема моделирования последовательной установки СМП в корпусе фрезы:

1 – установка главного угла в плане; 2 – установка угла наклона главной режущей кромки; 3 – установка по заданному диаметру в корпусе фрезы

Fig. 3. Simulation scheme of sequential installation of the RPI in the milling cutter body:

1 – setting the taper lead angle; 2 – setting the side rake angle; 3 – installation according to a given diameter in the milling cutter body

где $A_{43}^{\{2\}}(d/2)$ – матрица, определяющая установку СМП на заданный диаметр фрезы d в системе координат корпуса фрезы $X_4Y_4Z_4$:

$$A_{43}^{\{2\}}(d/2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A_{32}^{\{5\}}(\lambda)$ – матрица, задающая поворот СМП относительно оси OX_3 системы координат $X_3Y_3Z_3$ для обеспечения заданного угла наклона главной режущей кромки:

$$A_{32}^{\{5\}}(\lambda) = \begin{bmatrix} \cos \lambda & 0 & \sin \lambda & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \lambda & 0 & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A_{21}^{\{6\}}(\pi/2 - \varphi)$ – матрица, задающая поворот СМП относительно оси OX_2 системы координат $X_2Y_2Z_2$ для обеспечения заданного главного угла в плане:

$$A_{21}^{\{6\}}(\pi/2 - \varphi) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\pi/2 - \varphi) & -\sin(\pi/2 - \varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\pi/2 - \varphi) & \cos(\pi/2 - \varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Задавая вращение режущей кромки СМП (2) относительно оси инструмента, получим уравнение производящей поверхности исследуемой фрезы:

$$\bar{r}_f(t, \theta) = A_{f5}^{\{5\}}(\pi/2) \cdot A_{54}^{\{4\}}(\theta) \cdot \bar{r}_4(t), \quad (3)$$

где θ – угловой параметр производящей поверхности фрезы; $A_{f5}^{\{5\}}(\pi/2)$ – матрица, задающая поворот системы координат производящей поверхности инструмента для совмещения оси Z_f с осью корпуса фрезы:

$$A_{f5}^{\{5\}}(\pi/2) = \begin{bmatrix} \cos(\pi/2) & 0 & \sin(\pi/2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\pi/2) & 0 & \cos(\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A_{54}^{\{4\}}(\theta)$ – матрица, задающая поворот профиля режущей кромки СМП $\bar{r}_4(t)$ на величину угла θ .

На рис. 4 показан результат построения производящей поверхности фрезы с параметрами $d = 30$ мм, $\varphi = 90^\circ$ и $\lambda = 20^\circ$ по уравнению (3).

В результате задания величины угла $\lambda \neq 0$ производящая поверхность фрезы будет представлять собой однополосный гиперboloид вращения, характеризуемый непостоянством величин главных радиусов кривизны поверхности вдоль оси вращения, где наименьшая их величина достигается в точках $(0, \theta)$ для всех $\theta \in [0; 2\pi]$.

Уравнение обработанной поверхности при поступательном движении подачи фрезы вдоль оси X_0 детали и заданной величине поворота фрезы на величину угла (косоугольном фрезе-

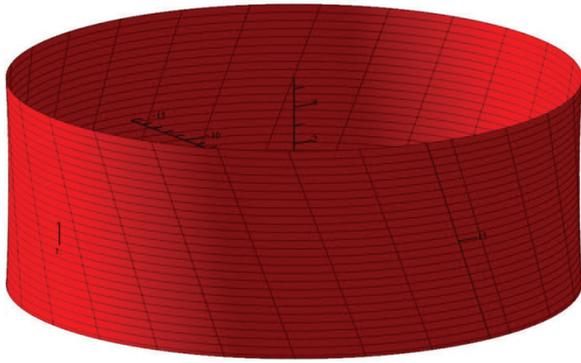


Рис. 4. Производящая поверхность фрезы

Fig. 4. Milling cutter generating surface

ровании) построим на основании уравнения формообразования:

$$\bar{r}_0(x, t, \theta) = A^{\{1\}}(x) \cdot A^{\{5\}}(\xi) \times A^{\{6\}}(-\theta) \cdot \bar{r}_f(t, \theta), \quad (4)$$

где x – параметр перемещения фрезы вдоль оси X_0 ; $A^{\{1\}}(x)$ – матрица, задающая перемещение фрезы вдоль оси X_0 :

$$A^{\{1\}}(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{\{5\}}(\xi)$ – матрица поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи на величину угла ξ :

$$A^{\{5\}}(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & 0 & \sin \xi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \xi & 0 & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{\{6\}}(-\theta)$ – матрица, задающая вращение фрезы:

$$A^{\{6\}}(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \sin(-\theta) & 0 & 0 \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для учета связи огибания вида $\theta = \theta(x, t)$ на основе уравнения (4) составим и решим относительно параметра θ уравнение

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial x} & \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial x} & \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial t} & \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial t} & \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial t} \\ \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial \theta} & \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial \theta} & \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial \theta} \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

что позволит представить уравнение (4) как функцию от двух параметров:

$$\bar{r}_0(x, t) = A^{\{1\}}(x) \cdot A^{\{5\}}(\xi) \times A^{\{6\}}(-\theta(x, t)) \cdot \bar{r}_f(t, \theta(x, t)). \quad (6)$$

На рис. 5 представлены графики функции $\theta(x, t)$ при $x = 0$ для фрезы с параметрами $d = 30$ мм, $\phi = 90^\circ$, $\lambda = 20^\circ$ и угла поворота фрезы ξ , равного 0° (линия 1) и 20° (линия 2). На рис. 6 показаны результаты моделирования производящей поверхности фрезы при ее повороте на угол $\xi = 20^\circ$ и номинальная обработанная поверхность.

Оценку кривизны обработанной поверхности выполним путем расчета двух главных кривизн k_1 и k_2 , которые являются корнями решения уравнения

$$k^2 - 2Hk + K = 0, \quad (7)$$

где

$$H = \frac{LG - 2FM + EN}{2(EG - F^2)}; \quad (8)$$

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}. \quad (9)$$

Здесь E, F, G – коэффициенты первой квадратичной формы (g) обработанной поверхности (6), описываемой формулой

$$g = E \cdot dx^2 + 2F \cdot dx \cdot dt + G \cdot dt^2; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E &= \left(\frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \right)^2; \\ F &= \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t}; \\ G &= \left(\frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t} \right)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

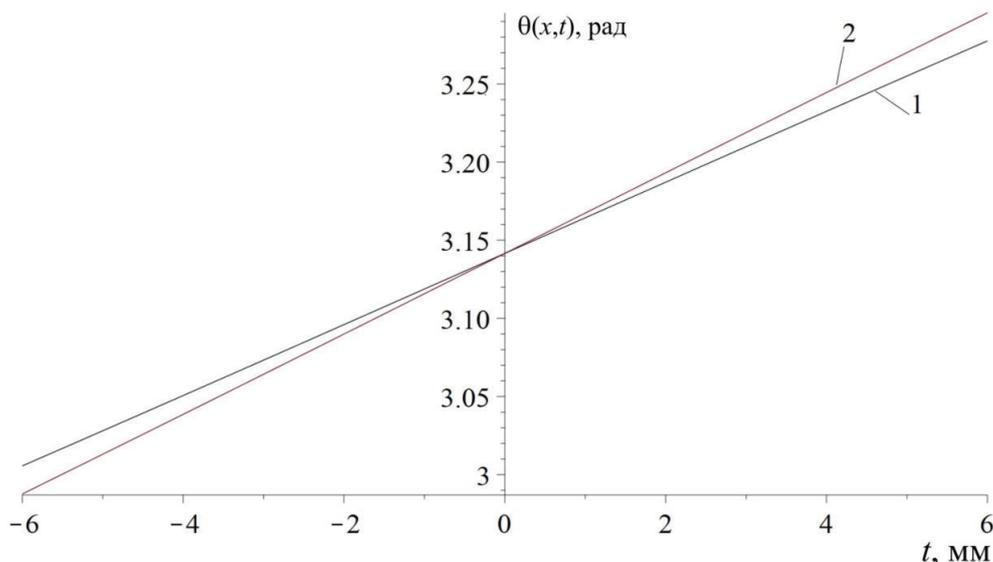


Рис. 5. Графики функции $\theta(x, t)$ при $x = 0$

Fig. 5. Graphs of the function $\theta(x, t)$ at $x = 0$

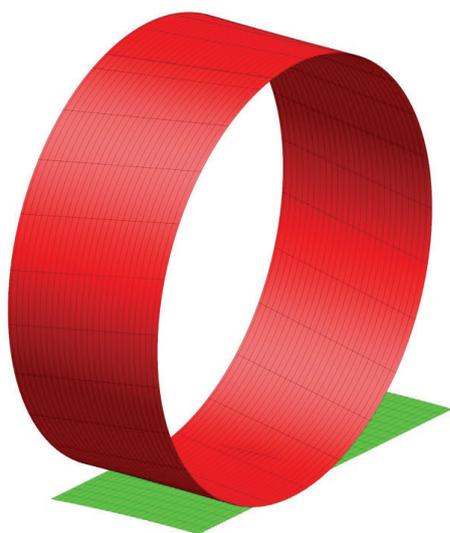


Рис. 6. Моделирование производящей поверхности фрезы и номинальной обработанной поверхности

Fig. 6. Modeling of the milling cutter's producing surface and the nominal machined surface

L, M, N – коэффициенты второй квадратичной формы (q) обработанной поверхности (6), описываемой формулой

$$q = L \cdot dx^2 + 2M \cdot dx \cdot dt + N \cdot dt^2; \quad (12)$$

$$L = \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \frac{\bar{n}(x, t)}{\sqrt{EG - F^2}}; \quad (13)$$

$$M = \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x \partial t} \frac{\bar{n}(x, t)}{\sqrt{EG - F^2}}; \quad (14)$$

$$N = \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t} \frac{\bar{n}(x, t)}{\sqrt{EG - F^2}}, \quad (15)$$

где $\bar{n}(x, t)$ – нормаль к обработанной поверхности:

$$\bar{n}(x, t) = \frac{\frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \times \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t}}{\left| \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \times \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t} \right|}. \quad (16)$$

Для удобства восприятия в дальнейшем вместо k_1 и k_2 будем рассматривать главные радиусы кривизны обработанной поверхности: $R_1 = k_1^{-1}$ и $R_2 = k_2^{-1}$.

Исследование главного радиуса кривизны обработанной поверхности в поперечном сечении (рис. 7) для фрезы с $d = 30$ мм, $\varphi = 90^\circ$, $\lambda = 20^\circ$ и $\xi = 0^\circ$ подтвердило, что наименьшего значения он достигает в точке поверхности формируемой серединой режущей кромки СМП ($t = 0$) и по мере удаления от середины увеличивается (кривая 1).

Исследование также показало (см. рис. 7), что увеличение угла поворота фрезы (при $\xi = 20^\circ$, кривая 2) приводит к уменьшению главного радиуса кривизны. На рис. 8 приведены

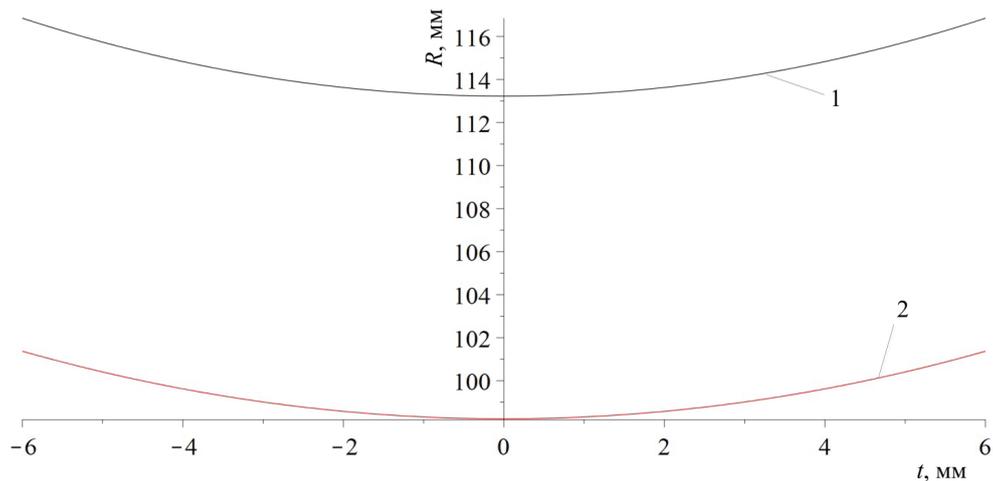


Рис. 7. Изменение главного радиуса кривизны (R) на различных участках обработанной поверхности в поперечном сечении

Fig. 7. Change of the main radius of curvature (R) on different sections of the processed surface in cross-section

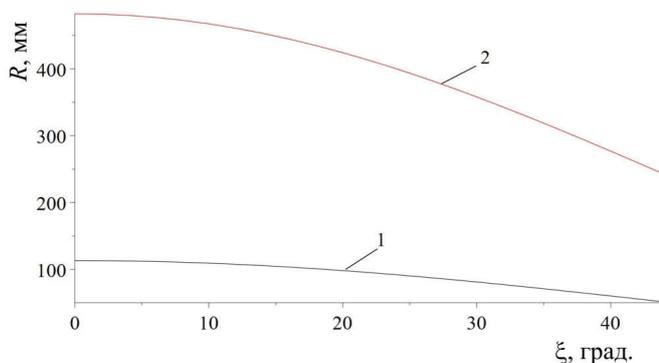


Рис. 8. Изменение главного радиуса кривизны (R) обработанной поверхности в поперечном сечении в зависимости от угла ξ

Fig. 8. Change of the main radius of curvature (R) of the treated surface in cross-section depending on the angle ξ

графики изменения главной кривизны обработанной поверхности в поперечном сечении (в точке $t = 0$) при различных углах поворота фрезы $\xi \in [0; 45^\circ]$ с параметрами $d = 30$ мм, $\varphi = 90^\circ$ и угле $\lambda = 10^\circ$ (линия 1) и 20° (линия 2).

Использование полученных формул позволяет выполнить расчет угла наклона главной режущей кромки СМП и углов поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи, которые будут обеспечивать наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы и поверхности детали в точках их контакта. Эти расчеты целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1) при заданном диаметре фрезы с использованием формулы (7) рассчитать минимальное

значение угла λ (при $\xi = 0^\circ$), обеспечивающего наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы в точке поверхности с наименьшей кривизной (наибольшим главным радиусом кривизны) из условия

$$R_{d \max} \approx R(\lambda, \xi), \quad (17)$$

где $R_{d \max}$ – наибольший радиус кривизны профиля формируемой поверхности; $R(\lambda, \xi)$ – главный радиус кривизны обработанной поверхности фрезой при заданном угле λ и угле поворота фрезы ξ .

2) при установленном значении угла λ выполнить расчет углов наклона фрезы ξ в остальных точках профиля формируемой поверхности из условия (17). В случае, когда обрабатываемые поверхности имеют большой диапазон значений главного радиуса кривизны, обеспечить строгое выполнение равенства (17) во всех точках может быть невозможно. Для этих точек необходимо принять угол ξ равным наибольшему возможному значению ($\xi = 45^\circ$).

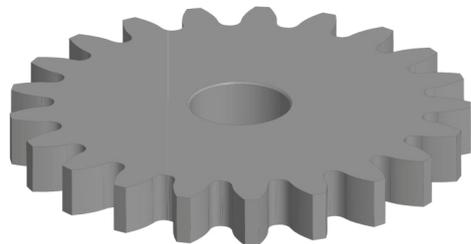
Результаты и их обсуждение

Практическое применение построенных моделей и установленных закономерностей рассмотрим на примере обработки эвольвентой поверхности прямозубчатого зубчатого колеса (рис. 9, а) с модулем 20 мм, количеством зубьев 21 и шириной венца 50 мм и с уравнением

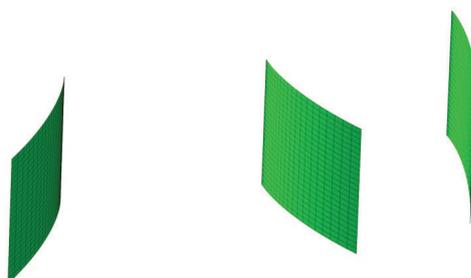
$$\bar{r}_d(u, v) = [R_0(\cos u + u \cdot \sin u) \quad R_0(\sin u - u \cdot \cos u) \quad v \quad 1]^T, \quad (18)$$

где R_0 – радиус основной окружности зубчатого колеса.

Для нашего колеса $R_0 = 197,3$ мм.



a



b

Рис. 9. Колесо зубчатое прямозубое: а – геометрическая модель; б – результат моделирования поверхности зубьев по формуле (17)

Fig. 9. Spur gear:

a – a geometric model; б – the result of modeling the surface of the teeth according to (17)

Вычисление главного радиуса кривизны данной поверхности в поперечном направлении показало, что его величина при $u \in [0; 0,61]$ изменяется в пределах от 0 до 120,5 мм. Диаметр фрезы был принят равным 30 мм, и выполнен расчет минимального значения угла λ (при $\xi = 0^\circ$), обеспечивающего наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы в точке поверхности с наименьшей кривизной (наибольшим главным радиусом кривизны) $u = 0,61$ исходя из условия (17). Шаг приращения угла λ был задан равным 30° , угол $\xi = 0^\circ$, и установлено, что условие (17) выполняется при $\lambda = 19^\circ$ с $R(19^\circ) = 126,5$ мм. Далее при заданном значении угла $\lambda = 19^\circ$ был выполнен расчет углов наклона фрезы ξ для точек профиля формируемой поверхности (рис. 10).

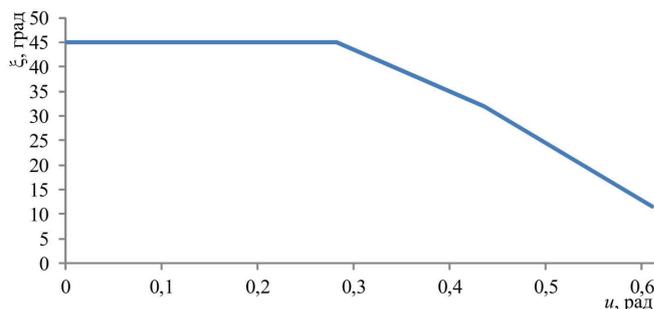


Рис. 10. Изменение угла ξ при $\lambda = 19^\circ$ и $u \in [0; 0,61]$

Fig. 10. Change of angle ξ at $\lambda = 19^\circ$ and $u \in [0; 0,61]$

На рис. 11 показано положение фрезы при формировании различных участков формируемой поверхности зуба колеса в соответствии с рассчитанными углами поворота фрезы (см. рис. 10).

На рис. 11 позиция 1 соответствует точке профиля поверхности зуба $u = 0$ рад; позиция 2 соответствует точке профиля поверхности зуба $u = 0,44$ рад; позиция 3 соответствует точке профиля поверхности зуба $u = 0,61$. Из рис. 11 следует, что с увеличением кривизны обрабатываемой поверхности увеличивается угол поворота фрезы.

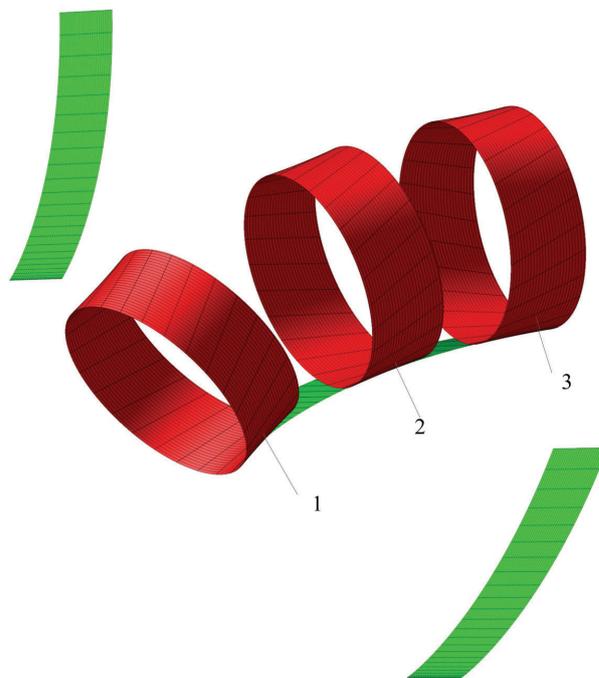


Рис. 11. Установка фрезы в различных точках формируемой поверхности

Fig. 11. Installation of the milling cutter across points of the surface being formed

Выводы

Установленные закономерности изменения главного радиуса кривизны обработанной поверхности в поперечном сечении позволят при построчной обработке протяженных участков деталей с криволинейным профилем (в частности выпуклых участков поверхности) на многокоординатных станках с ЧПУ за счет поворота фрезы обеспечить наилучшее прилегание ее производящей поверхности к обработанной поверхности в точке их контакта, а также обеспечить снижение погрешности аппроксимации профиля обработанной поверхности и повышение производительности обработки за счет возможности увеличения шага перемещения инструмента вдоль формируемого профиля.

Список литературы

1. Вэй П.М. Повышение эффективности контурной обработки на станках с ЧПУ путем коррекции траектории и режимов резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 22 с.
2. Petrakov Y., Shuplietsov D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2, N 1 (98). – P. 54–60. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162673.
3. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. Technology for programming contour milling on a CNC machine // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2. – P. 55–61. – DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.
4. Dumitrache A., Borangiu T., Dogar A. Automatic generation of milling toolpaths with tool engagement control for complex part geometry // IFAC Proceedings Volumes. – 2020. – Vol. 43. – P. 252–257. – DOI: 10.3182/20100701-2-pt-4011.00044.
5. Управление точностью контурной обработки концевыми фрезами / В.А. Тимирязев, М.З. Хостиков, И.К. Данилов, А.Г. Дацко // СТИН. – 2020. – № 12. С. 22–26.
6. A novel gear machining CNC design and experimental research / J. Han, L. Wu, B. Yuan, X. Tian, L. Xia // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 88. – P. 1711–1722. – DOI: 10.1007/s00170-016-8883-y.
7. Kim H.C., Lee S.G., Yang M.Y. An optimized contour parallel tool path for 2D milling with flat end-mill // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 31. – P. 567–573. – DOI: 10.1007/s00170-005-0228-1.
8. Operation planning based on cutting process models / M.D. Tsai, S. Takata, M. Inui, F. Kimura, T. Sata // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1991. – Vol. 40. – P. 95–98. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61942-8.
9. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: Helical end mills // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – Vol. 41. – P. 2195–2212. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00045-1.
10. Камсюк М.С. О точности обработки сложно-контурных деталей на станках с ЧПУ, оснащенных поворотными столами // Точность и производительность обработки на станках с ЧПУ. – М.: МВТУ, 1982. – С. 59–86. – (Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 376).
11. Колесов К.Н. Повышение эффективности работы концевых твердосплавных фрез на основе выбора элементов кинематики формообразования и конструктивных параметров инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 19 с.
12. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2, N 1 (98). – P. 60–69. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163325.
13. Influence assessment of metal-cutting equipment geometrical accuracy on OMV-technologies accuracy / A.G. Koltsov, D.A. Blokhin, E.V. Krivonos, A.N. Narezhev // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, 15–17 November. – Omsk, 2016. – P. 7819029. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819029.
14. Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining // Computer Aided Design. – 2003. – Vol. 35, N 4. – P. 333–346.
15. Petrakov Y., Shuplietsov D. Programming of adaptive machining for end milling // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – Vol. 1 (79). – P. 34–40. – DOI: 10.20535/2521-1943.2017.79.97342.
16. Lee S.K., Ko S.L. Development of simulation system for machining process using enhanced Z map model // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 3. – P. 608–617. – DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00761-6.
17. Calculating the Hausdorff distance between curves / E. Belogay, C. Cabrelli, U. Molter, R. Shonkwiler // Information Processing Letters. – 1997. – Vol. 64, iss. 1. – P. 17–22. – DOI: 10.1016/s0020-0190(97)00140-3.
18. Nosov P.S., Yalansky A.D., Iakovenko V.O. 3D Modelling of rehabilitation corset with use of power-shape delcam // Information Technologies in Educa-

tion, Science and Production. – 2013. – Vol. 1, iss. 2. – P. 222–230.

19. *Omm O.C.* Разработка сборных дисковых фрез с кинематическим обкаточным движением для обработки зубчатых колес крупного модуля на станках с ЧПУ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 23 с.

20. *Ott O.S., Artyukhin L.L.* Shaping involute profiles by means of a disk tool // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, N 3. – P. 283–287. – DOI: 10.3103/S1068798X11030221.

21. *Omm O.C.* Формирование эвольвентных поверхностей деталей дисковым инструментом // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2010. – № 3 (11). – С. 67–71.

22. *Гречишников В.А., Колесов Н.В., Петухов Ю.Е.* Математическое моделирование в инструментальном производстве. – М.: МГТУ «Станкин», 2003. – 113 с.

23. *Golebski R., Boral P.* Study of machining of gears with regular and modified outline using CNC machine tools // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2913. – DOI: 10.3390/ma14112913.

24. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Са-

рилов. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2015. – 282 с. – ISBN 978-5-7765-1175-2.

25. *Куц В.В.* Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук. – Курск, 2012. – 365 с.

26. *Емельянов С.Г., Куц В.В.* Математическое моделирование сборных фасонных фрез. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2008. – 254 с. – ISBN 978-5-7681-0364-4.

27. *Isaev A.V., Grechishnikov V.A.* Machining curvilinear sections by means of cutting plates with a linear edge // *Russian Engineering Research*. – 2010. – Vol. 30, N 4. – P. 413–417. – DOI: 10.3103/S1068798X10040222.

28. *Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н.* Повышение эффективности чистой обработки крупномодульных зубчатых колес // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 8–17. – DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17.

29. *Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Чистяков П.П.* Схемы формообразования гиперболическими инструментами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – № 8-1. – С. 133–140.

Конфликт интересов

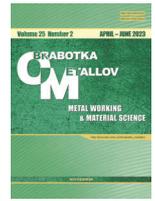
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Theoretical study of the curvature of the treated surface during oblique milling with prefabricated milling cutters

Vadim Kuts^{a, *}, Sergey Chevychelov^b

Southwest State University, 94, 50 let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>, kuc-vadim@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0009-0006-8958-2191>, tschsa@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 March 2023

Revised: 29 March 2023

Accepted: 15 April 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Form-generating method

Interlocking side mill

Oblique milling

Surface curvature

The main radii of curvature

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the methods of processing large parts having curved convex surfaces with a rectilinear guide on multi-coordinate CNC machining centers using the touch method with a discrete motion of the tool feed along the profile of the part. It is shown that the main disadvantages of this method are lower productivity, which is due to the presence of discrete tool motions between cycles of its translation mode, where the value of discrete tool motion for a given processing accuracy depends on the curvature of the surface being processed. To improve processing performance, it is proposed to use prefabricated disc cutters equipped with replaceable polyhedral inserts (RPI) with rectilinear cutting edges. Its installation in the cutter body with non-zero angles of inclination of the main cutting edge, in combination with an additional rotation of the cutter, during processing, along the direction of the translational feed movement, allows you to obtain a concave surface and ensure a tighter fit of the producing surface of the tool and the machined surface of the part. **The aim** of the work is to reduce the error of approximation of the profile when it is processed using the touch method with discrete motion of prefabricated disc cutters along the profile and, consequently, to ensure workpiece the possibility of increasing the step of tool movement along the profile being formed to improve processing performance. **Research methods:** geometrical theory of designing metal-cutting tools. **Results and discussion.** The regularities established in the work made it possible to create a method for determining the angle of inclination of the main cutting edge of the RPI milling cutter and the angles of rotation of the milling cutter along the direction of translational feed movement during line-by-line processing of extended sections of parts with a curved profile on multi-coordinate CNC machines by turning the milling cutter to ensure the best fit of its producing surface to the surface being processed at the point of its contact, to reduce the approximation error processed profile and improve processing performance, due to the possibility of increasing the tool movement step.

For citation: Kuts V.V., Chevychelov S.A. Theoretical study of the curvature of the treated surface during oblique milling with prefabricated milling cutters. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 32–44. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-32-44. (In Russian).

References

1. Wei P.M. *Povyshenie effektivnosti konturnoi obrabotki na stankakh s ChPU putem korrleksii traektorii i rezhimov rezaniya*. Avtoref. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of contour machining on CNC machines by correcting the trajectory and cutting modes. Author’s abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2014. 22 p.
2. Petrakov Y., Shuplietsov D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 2, no. 1 (98), pp. 54–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162673.
3. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. Technology for programming contour milling on a CNC machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, vol. 2, pp. 55–61. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.

* Corresponding author

Kuts Vadim V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
Southwest State University,
94, 50 let Oktyabrya str.,
305040, Kursk, Russian Federation
Tel.: 8 (903) 639-94-01, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru



4. Dumitrache A., Borangiu T., Dogar A. Automatic generation of milling toolpaths with tool engagement control for complex part geometry. *IFAC Proceedings Volumes*, 2020, vol. 43, pp. 252–257. DOI: 10.3182/20100701-2-pt-4011.00044.
5. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I.K., Datsko A.G. Upravlenie tochnost'yu konturnoi obrabotki kontsevyimi frezami [Precision control of contour machining with end mills]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2020, no. 12, pp. 22–26. (In Russian).
6. Han J., Wu L., Yuan B., Tian X., Xia L. A novel gear machining CNC design and experimental research. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 1711–1722. DOI: 10.1007/s00170-016-8883-y.
7. Kim H.C., Lee S.G., Yang M.Y. An optimized contour parallel tool path for 2D milling with flat endmill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 31, pp. 567–573. DOI: 10.1007/s00170-005-0228-1.
8. Tsai M.D., Takata S., Inui M., Kimura F., Sata T. Operation planning based on cutting process models. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1991, vol. 40, pp. 95–98. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61942-8.
9. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: Helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, pp. 2195–2212. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00045-1.
10. Kamsyuk M.S. O tochnosti obrabotki slozhnokonturnykh detalei na stankakh s ChPU, osnashchennykh povorotnymi stolami [About the accuracy of processing of complex-contoured parts on CNC machines equipped with turntables]. *Tochnost' i proizvoditel'nost' obrabotki na stankakh s ChPU* [Precision and productivity of machining on CNC machines]. Moscow, BMSTU Publ., 1982, pp. 59–86.
11. Kolesov K.N. *Povyshenie effektivnosti raboty kontsevykh tverdospaynykh frez na osnove vybora elementov kinematiki formoobrazovaniya i konstruktivnykh parametrov instrumenta*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of end carbide cutters based on the selection of kinematics elements of shaping and design parameters of the tool. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2011. 19 p.
12. Skorkin A., Kondratyuk O., Lamnauer N., Burdeinaya V. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 2, no. 1 (98), pp. 60–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163325.
13. Koltsov A.G., Blokhin D.A., Krivonos D.A., Narezhev A.N. Influence assessment of metal-cutting equipment geometrical accuracy on OMV-technologies accuracy. *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, Omsk, 15–17 November 2016, p. 7819029. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819029.
14. Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining. *Computer aided design*, 2003, vol. 35, no. 4, pp. 333–346.
15. Petrakov Y., Shuplietsov D. Programming of adaptive machining for end milling. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2017, vol. 1 (79), pp. 34–40. DOI: 10.20535/2521-1943.2017.79.97342.
16. Lee S.K., Ko S.L. Development of simulation system for machining process using enhanced Z map model. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 3, pp. 608–617. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00761-6.
17. Belogay E., Cabrelli C., Molter U., Shonkwiler R. Calculating the Hausdorff distance between curves. *Information Processing Letters*, 1997, vol. 64, iss. 1, pp. 17–22. DOI: 10.1016/s0020-0190(97)00140-3.
18. Nosov P.S., Yalansky A.D., Iakovenko V.O. 3D Modelling of rehabilitation corset with use of powershape delcam. *Information Technologies in Education, Science and Production*, 2013, vol. 1, iss. 2, pp. 222–230.
19. Ott O.S. *Razrabotka sbornykh diskovykh frez s kinematicheskim obkatochnym dvizheniem dlya obrabotki zubchatykh koles krupnogo modulya na stankakh s ChPU*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of prefabricated disk cutters with kinematic winding motion for processing gears of a large module on CNC machines. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2011. 23 p.
20. Ott O.S., Artyukhin L.L. Shaping involute profiles by means of a disk tool. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 3, pp. 283–287. DOI: 10.3103/S1068798X11030221.
21. Ott O.S. Formirovanie evol'ventnykh poverkhnostei detalei diskovym instrumentom [Formation of involute surfaces of parts with a disk tool]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSUT «Stankin»*, 2010, vol. 3 (11), pp. 67–71.
22. Grechishnikov V.A., Kolesov N.V., Petukhov Yu.E. *Matematicheskoe modelirovanie v instrumental'nom proizvodstve* [Mathematical modeling in tool manufacturing]. Moscow, MSUT “Stankin” Publ., 2003. 113 p.
23. Gołębski R., Boral P. Study of machining of gears with regular and modified outline using CNC machine tools. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 2913. DOI: 10.3390/ma14112913.
24. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Yu., Oleinik A.V., Sarilov M.Yu. *Metodologiya strukturno-parametricheskogo sinteza metallozhushchikh sistem* [Methodology of structural-parametric synthesis of metal-

cutting systems]. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University Publ., 2015. 282 p. ISBN 978-5-7765-1175-2.

25. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallozhushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of contour machining on CNC machines by correcting the trajectory and cutting modes. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.

26. Emel'yanov S.G., Kuts V.V. *Matematicheskoe modelirovanie sbornykh fazonnykh frez* [Mathematical modeling of prefabricated shaped milling cutters]. Kursk, KurskSTU Publ., 2008. 254 p. ISBN 978-5-7681-0364-4.

27. Isaev A.V., Grechishnikov V.A. Machining curvilinear sections by means of cutting plates with a linear edge. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 4, pp. 413–417. DOI: 10.3103/S1068798X10040222.

28. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Khomutov R.N. Povyshenie effektivnosti chistovoi obrabotki krupnomodul'nykh zubchatykh koles [Improving the finishing efficiency of coarse-grained gear wheels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the South-West State University*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 8–17. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17.

29. Emelyanov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. Skhemy formoobrazovaniya giperboloidnymi instrumentami [Schemes for formation of hyperboloid instruments]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2017, no. 8-1, pp. 133–140.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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

Гибридное технологическое оборудование: к вопросу рационального выбора объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии

Вадим Скиба^{1,а,*}, Егор Зверев^{1,б}, Павел Скиба^{2,с}, Алексей Черников^{3,1,д}, Андрей Попков^{1,е}

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

² АО «Новосибирский стрелочный завод», ул. Аксенова, 7, г. Новосибирск, 630025, Россия

³ ОАО «ГЛК-Промышленные технологии», ул. Большевикская, 177, цех 16, г. Новосибирск, 630083, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeeba_vadim@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-4405-6623>,  egor_z@ngs.ru,

^с  <https://orcid.org/0000-0002-0327-992X>,  Pavel_skeeba_ptm@mail.ru, ^д  <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>,  aleksey.chernikov.97@mail.ru,

^е  <https://orcid.org/0009-0006-5587-9990>,  andrej.popkov.2013@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06(07): 621.785

История статьи:

Поступила: 15 марта 2023

Рецензирование: 17 апреля 2023

Принята к печати: 15 мая 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Гибридное оборудование

Многолезвийная механическая обработка

Высокоэнергетический нагрев

Резание

Индукционная закалка

Финансирование

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

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции невозможно без достижения высоких показателей ресурсо- и энергосбережения при обеспечении современными станочными системами должного уровня производственной гибкости в совокупности с гарантированно высокими значениями производительности обработки и требуемым уровнем качества изготовления деталей. Недостаточный или избыточный запас возможностей технологического оборудования приводит к снижению его экономической эффективности, повышению капитальных затрат и, как следствие, удорожанию продукции. В станкостроении – стратегически значимой и базовой отрасли для модернизации машиностроения – наблюдается особый интерес к разработке нового типа технологического оборудования, позволяющего реализовать методы модифицирования поверхностных слоев деталей путем их обработки источниками концентрированной энергии. Совмещение двух обрабатывающих технологий (механической и поверхностно-термической операций) в условиях интегрального оборудования позволяет нивелировать недостатки монотехнологий и получить новые эффекты, недостижимые при использовании технологий по отдельности. Обеспечение оптимального уровня качества – одного из безусловных требований рыночной экономики – является приоритетной задачей при разработке общей концепции технологического оборудования. Таким образом, следует отметить, что требуемый и определенный комплекс потребительских свойств закладывается при проектировании. Следовательно, задача оптимизации качества относится к области прогнозтики и должна комплексно решаться на начальном этапе разработки концепции технологического оборудования. **Цель настоящих исследований** заключается в рациональном выборе объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии. **Методы.** Теоретические исследования возможного структурного состава и компоновки гибридного оборудования при интеграции механических и поверхностно-термических процессов производились с учетом основных положений структурного синтеза и компонентки металлообрабатывающих систем. При проведении исследований были затронуты вопросы, связанные с основными положениями системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей, конструирования металлообрабатывающих станков, методов математического и компьютерного моделирования. **Результаты и обсуждение.** Теоретическими исследованиями было установлено, что в настоящее время большинство параметрических (типоразмерных) рядов металлорежущих станков общего назначения, построенных по закону геометрической прогрессии с постоянным знаменателем, являются причиной многократного дублирования отдельных размерных диапазонов на станках одного ряда. Это дает основание говорить о необоснованном увеличении количества его членов и, как следствие этого, росте расходов на проектирование, изготовление и эксплуатацию оборудования. Авторы придерживаются точки зрения, что для обеспечения максимальной эффективности гибридного металлообрабатывающего оборудования необходимо реализовать параметрический ряд, построенный с переменным знаменателем. Подобный принцип формирования параметрического ряда позволяет обеспечить практически равную вероятность обработки с максимальной производительностью поверхности любого размера при трехкратном перекрытии диапазонов. Произведена апробация методики формирования структуры параметрических рядов. Теоретически доказано, что при эксплуатации вертикально-фрезерных станков действующего параметрического ряда со знаменателем $\phi = 1,26$ (ГОСТ 9726–89) имеет место многократное перекрытие отдельных размерных диапазонов, достигающих в определенном интервале размеров девятикратной величины, что, безусловно, отражается на эффективности действующего станочного парка. В свою очередь, при синтезе перспективного параметрического ряда вертикально-фрезерных станков с крестовым столом было показано, что новый параметрический ряд имеет меньшее количество членов. Сокращение номенклатуры выпускаемых и модернизируемых станков позволит повысить серийность их производства и снизить текущие расходы на ремонт и обслуживание, причем этот эффект достигается при сохранении гибкости станочного парка.

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

*Адрес для переписки

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

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

г. Новосибирск, 630073, Россия

Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

В условиях интенсификации рыночного производства наблюдается стремление к сокращению энергетических, материальных и людских ресурсов, что приводит к необходимости повышения эффективности технологического оборудования в значительной мере за счет выбора наиболее рациональных технических характеристик. Эта тенденция, направленная на повышение энерго- и ресурсосбережения и обусловленная применением современных высокопроизводительных станочных систем, которые обладают необходимым уровнем производственной гибкости, ведет к росту конкурентоспособности выпускаемой продукции высокого качества [1–18]. Использование оборудования с запасом возможностей, недостаточным или превышающим требуемый, снижает экономическую эффективность и повышает уровень капитальных затрат, что приводит к увеличению себестоимости продукции [19, 20].

Одним из основных векторов развития современного машиностроения является разработка и создание высокотехнологичного оборудования. В станкостроении, ведущей машинострои-

тельной отрасли, примером такого оборудования могут служить комплексированные металлообрабатывающие системы [21–32], в основу построения которых положен принцип полифункциональной интеграции [5, 7, 17, 21, 33–46].

Один из способов повысить технологический потенциал металлообрабатывающего оборудования [1, 5, 17, 21, 24, 26, 27, 38, 42, 44] – это интеграция нескольких технологических операций на одном гибридном станке (например, предварительное фрезерование – поверхностная закалка – чистовое фрезерование; абразивное шлифование – поверхностная закалка; точение – закалка – ультразвуковая упрочняюще-отделочная обработка; точение – закалка – алмазное выглаживание [28, 31, 37–64]), что дает возможность обеспечить автономную работу отдельных единиц оборудования в условиях гибкого производства. Это позволит сократить номенклатуру станочного парка, что в свою очередь приведет к уменьшению площадей цехов и предприятий в целом [1, 5, 7, 17, 21, 38, 62]. Решение производственных задач с применением такого оборудования будет менее ресурсозатратным и, кроме того, приведет к сокращению производственного цикла изготовления деталей машин (рис. 1).

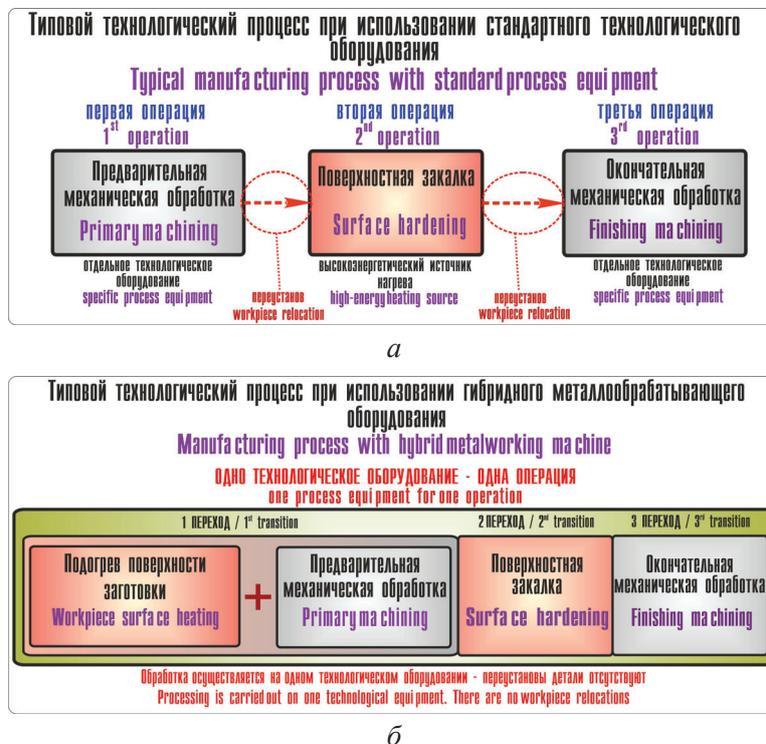


Рис. 1. Типовой технологический процесс (а) и технологический процесс при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования (б)
 Fig. 1. Typical manufacturing process (a) and manufacturing process with hybrid metalworking equipment (b)

В традиционном процессе изготовления деталей отдельные операции (поверхностно-термического упрочнения и механической обработки) осуществляются на разном оборудовании и на разных участках цехов, что способствует появлению значительных погрешностей на каждой стадии технологического процесса: деформации материала при термической обработке, погрешности установки деталей на каждой единице оборудования. Всё это приводит к необходимости назначения больших припусков на чистовую обработку, которые могут составить до 30–40 % заданной глубины от упрочненного слоя [7, 17, 28, 38, 62]. Тогда необходимая глубина упрочнения, обеспечиваемая термической обработкой, должна быть несколько больше, чем указано в документации. Кроме того, наиболее эффективная часть упрочненного поверхностного слоя удаляется финишной механической обработкой. В результате использования такой технологии снижается производительность как поверхностно-термических, так и механических операций, а энергозатраты возрастают. Объединение двух этих процессов на одном оборудовании позволяет нивелировать указанные выше недостатки и достичь более высоких результатов. Разработанные технологические рекомендации, реализуемые на предлагаемом гибридном оборудовании, позволят повысить технико-экономическую эффективность производства и снизить потери [7, 17, 28, 38, 62, 64]. Внедрение предлагаемой новой технологии, в свою очередь, увеличит конкурентоспособность производимой продукции. На эффективность применения интегрированных технологий также оказывает значительное влияние снижение потерь времени на

промежуточные и вспомогательные операции в общем технологическом процессе.

Появлению нового метода обработки деталей, связанного с использованием радиочастот – высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ), – способствовали разработки в области миниатюризации индукторов и оснащения их ферритовыми магнитопроводами. Предлагаемый метод на данный момент является одним из наиболее интересных методов упрочнения конструкционных сталей [38, 42, 65–70]. Его конкурентоспособность по отношению к другим методам упрочнения металла без оплавления (рис. 2), такими как лазер или электронный луч, обусловлено возможностью реализации технологического процесса закалки при удельных мощностях нагрева порядка 400 МВт/м^2 . Стоит отметить, что объединение двух процессов обработки (механического и поверхностно-термического) на единой станочной базе [7, 28, 38, 42, 62] обеспечивает постоянство требуемого зазора между индуктором и обрабатываемой деталью, который составляет $\delta = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$, что является необходимым условием обработки ВЭН ТВЧ.

Создание нового стандартного оборудования связано с большими финансовыми и трудовыми затратами, в то время как модернизация существующих станков обходится значительно дешевле. Исходя из этого нами предлагается следующее решение: модернизация стандартного металлорежущего станка, которая заключается в дооснащении его дополнительным концентрированным источником энергии – например, генератором ТВЧ. В качестве источника энергии высокой концентрации нами будут рассмо-

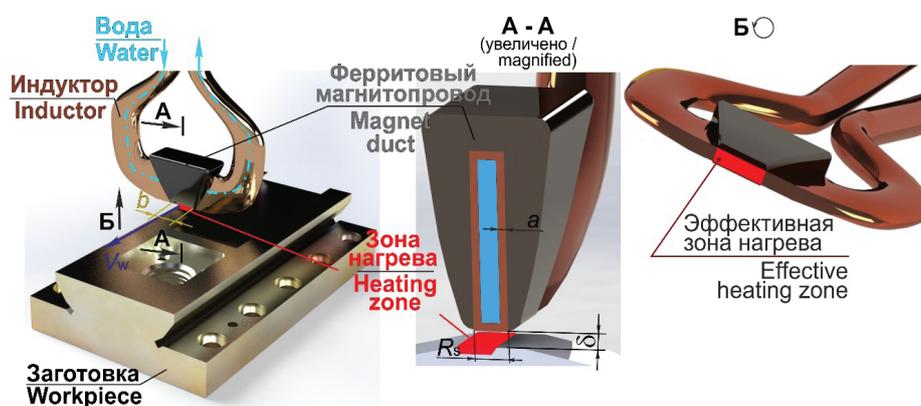


Рис. 2. Схема обработки при ВЭН ТВЧ
Fig. 2. The scheme of HEN HFC processing

трены генераторы типа СВЧ. Это обусловлено конструктивными особенностями стандартной станочной системы и современным уровнем развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных установок тигристорного типа [7, 28, 38, 42, 62].

Изменения, внесенные в процессе модернизации стандартной станочной системы, не должны оказывать негативного влияния на качественные показатели оборудования. Исходя из требований рыночной экономики, обеспечение оптимального уровня качества изделий является приоритетной задачей, решение которой должно осуществляться уже на стадии разработки общей концепции технологического оборудования. Качество изделия обуславливается определенным комплексом потребительских свойств, заложенных на начальном этапе концептуального проектирования, что позволяет прогнозировать его оптимальный уровень. Так, например, выбор структуры параметрического (типоразмерного) ряда станков и обоснование технических характеристик его элементов должны осуществляться параллельно, что в условиях современного развития машиностроения является составной частью систем автоматического проектирования технологического оборудования [19, 20]. Несмотря на имеющиеся некоторые научные результаты в этом направлении, единая обобщенная теория решения данного вопроса отсутствует.

Качество является многогранным и емким понятием, оно отображает ряд свойств рассматриваемого объекта, характеризующих способность продукции в соответствии со своим назначением удовлетворять определенные потребительские требования. С инженерной точки зрения качество оценивается методом сравнительного анализа совокупности свойств какого-либо изделия со свойствами эталона или аналогичного изделия, принятого за базу сравнения. Прогноз качества планируемого изделия следует начинать с определения минимального набора свойств, необходимых для его оценки. Свойства должны выбираться из системы фундаментальных категорий и понятий, и они должны быть значимыми. К ним относятся пространство и время – категории, отражающие формы существования материи: протяженность и взаиморасположение материальных объектов, длительность и последовательность смены событий. Как общая мера

движения и взаимодействия всех видов материи используется еще одна категория – энергия [19, 20].

Однако свойств и описывающих их параметров или характеристик, присущих природным объектам, обычно оказывается недостаточно для описания созданных человеком технических систем. В таком случае необходимо воспользоваться стандартной номенклатурой основных групп показателей, позволяющей всесторонне оценить качество рассматриваемой продукции. В станкостроительной отрасли традиционно используют определенный набор частных и комплексных показателей, которые в большинстве случаев применяют при выборе оборудования для выполнения определенных функций, а также выявлении его технического уровня и конкурентоспособности [7, 17, 19, 20]. Эффективность, производительность, технологичность, гибкость, точность, надежность, эргономичность и эстетичность станочных систем, как правило, являются основными показателями качества оборудования.

Очевидно, что при обосновании основных параметров и технических характеристик оборудования чаще всего оперируют их количественной оценкой: габаритами рабочей зоны (пространство), скоростными возможностями (время) и мощностью приводов (энергия). Дополнительные параметры, определяющие отличия одних объектов от других, в большинстве случаев могут быть представлены в виде качественных оценок – например, различными классами точности, типом управления (ручное или программное), архитектурой и другими характеристиками гибридных металлообрабатывающих станков [7, 17, 19, 20, 38, 42].

Разница между проектными возможностями оборудования и возможностями, необходимыми для осуществления своих функций в соответствии с назначением, представляет собой потери (избыточный или недостаточный запас способностей).

К факторам, влияющим на возникновение потерь, можно отнести неполное использование рабочего пространства, мощность электродвигателя, диапазон частот вращения шпинделя и др. В качестве примера можно рассмотреть результаты исследования условий эксплуатации фрезерных станков с ЧПУ, показывающие, что при выполнении 90 % операций мощность, потре-

бляемая приводом главного движения, составляет не более 50 % от номинального значения, грузоподъемность стола используется не более чем на 20 %, применяемые рабочие подачи фактически не превышают 1/6 от максимально допустимых и т. д. Для станков других групп наблюдается аналогичная ситуация [19, 20, 71, 72]. Результаты исследований зарубежных ученых практически идентичны отечественным. Данные, полученные для универсальных металлорежущих станков с ручным управлением и станков с ЧПУ, в части использования их технологических возможностей также не имеют значительных отличий.

Цель настоящих исследований заключается в рациональном выборе объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого может быть использован генератор ТВЧ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Предложить методику структурного анализа, позволяющую эффективно выполнять предпроектные исследования при разработке гибридного металлообрабатывающего оборудования.

2. Разработать метод формирования структурных рядов станочного оборудования с учетом равенства средних потерь производительности.

Теория и методика экспериментального исследования

Исполнительные движения гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС) и необходимое количество их настраиваемых параметров определялись посредством применения структурно-кинематического синтеза механизмов металлорежущих станков [73–76]. Основные положения структурного синтеза и компоновки рассматриваемых систем, приведенные в работах [75–85], использовались для проведения исследований предполагаемого структурного состава и компоновки ГМС, в которой интегрированы механические операции и поверхностно-термическая обработка.

При разработке интегрального металлообрабатывающего оборудования предполагается

реализовать на одном из технологических переходов гибридного станка метод высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты.

Производящие линии обрабатываемой поверхности формируются локальными участками нагрева. Габариты этих линий обусловлены особенностями конструкции индукторов для ВЭН ТВЧ и определяются шириной активного провода индуктора и длиной ферритового магнитопровода (см. рис. 2). Очевидно, что для осуществления операций поверхностной закалки и формообразования методом фрезерования (рис. 3) требуются одинаковые согласованные относительные движения заготовки и режущего инструмента. Результаты структурно-кинематического анализа показали, что на всех переходах комплексированной обработки (предварительное фрезерование, закалка ВЭН ТВЧ и чистовое фрезерование) исполнительные движения и комплекс настраиваемых в них параметров идентичны.

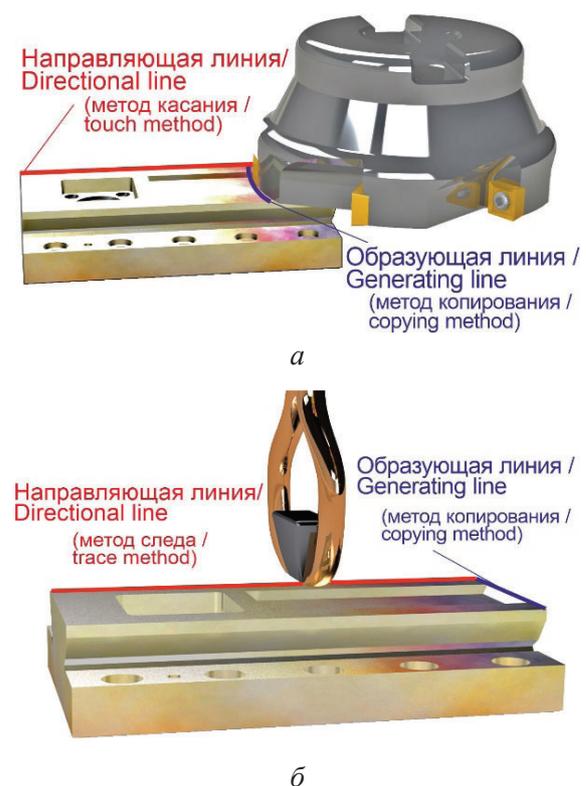


Рис. 3. Формообразование плоской поверхности:

a – при механической обработке (фрезерование);
б – при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ индуктором петлевого типа с магнитопроводом

Fig. 3. Generation of geometry (flat surface):
a – during machining (milling); *б* – during surface hardening by HEH HFC with loop inductor with a magnetic core

На рис. 4 представлены частные структурные формулы компоновок в совокупности со структурно-кинематическими схемами (СКС) для каждого в отдельности метода обработки.

Последующий синтез обобщенной кинематической структуры разрабатываемой гибридной металлообрабатывающей системы на основе консольно-фрезерного станка производился

по схеме агрегатного построения компоновки (рис. 5). При этом методе формулу компоновки можно представить в следующем виде:

$$XYZ0b(w_1\hat{C}_v + w_2),$$

где X, Y – продольное и поперечное перемещение крестового стола соответственно; Z – вертикальное перемещение консоли; b – поворот шпиндельной головки; w_1 – ручное перемеще-

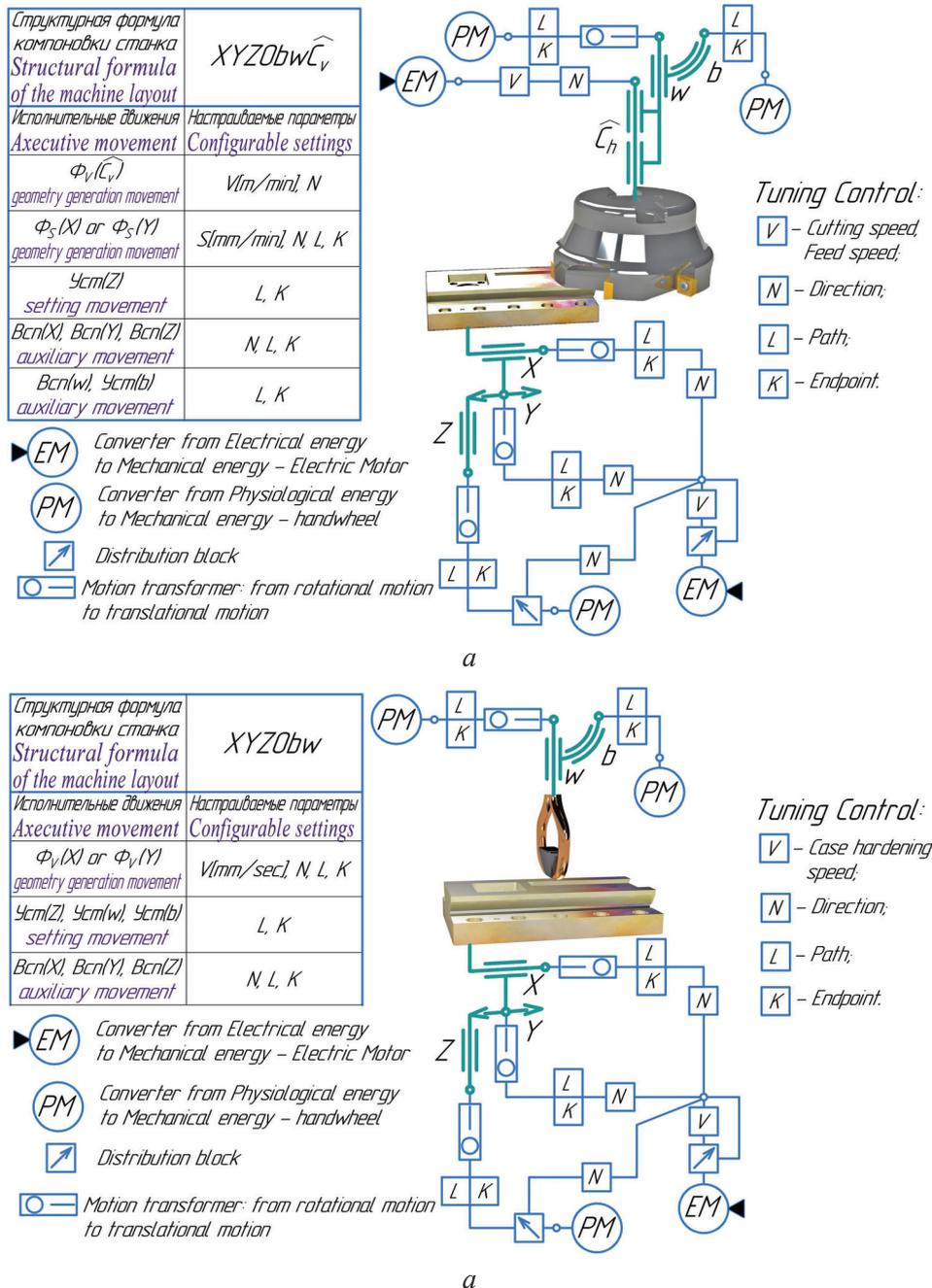


Рис. 4. Структурно-кинематические схемы при обработке плоской поверхности:

a – фрезерование; *б* – поверхностная закалка ВЭН ТВЧ индуктором петлевого типа с магнитопроводом

Fig. 4. Structural kinematic schemes for processing a flat surface:
a – milling; *b* – surface hardening by HEH HFC with loop inductor with a magnetic core

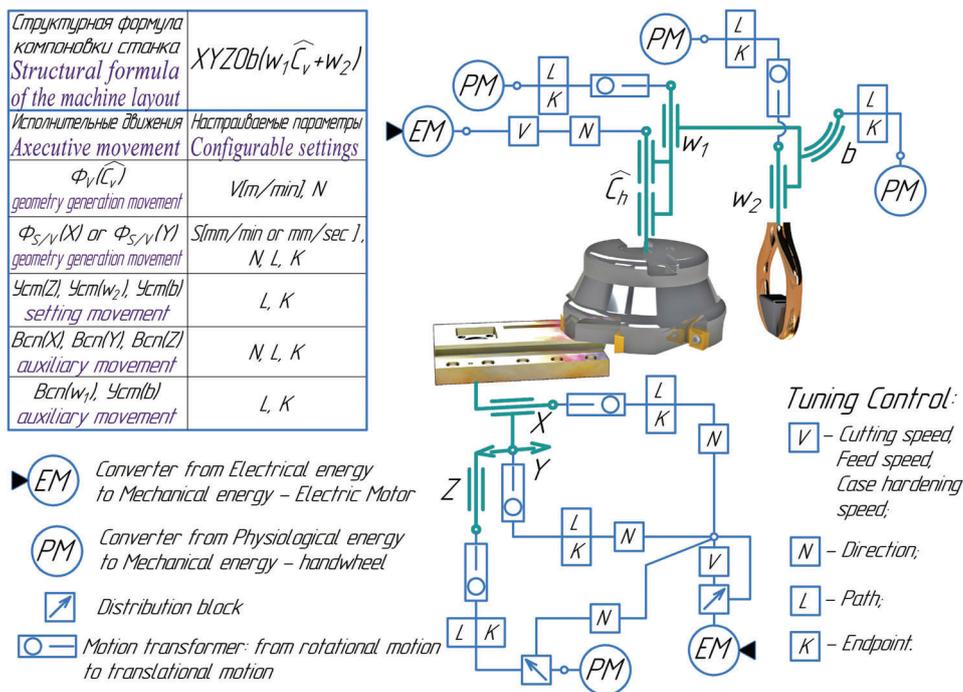


Рис. 5. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула $XYZ0b(w_1\hat{C}_v + w_2)$

Fig. 5. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is $XYZ0b(w_1\hat{C}_v + w_2)$

ние шпиндельной гильзы вдоль оси шпинделя; \hat{C}_v – вращение шпинделя с режущим инструментом; w_2 – ручное перемещение индуктора вдоль оси шпинделя. Блок C_v , выполняющий главное движение резания при фрезеровании, дополнительно помечен знаком \wedge .

В настоящее время большинство параметрических (типоразмерных) рядов металлорежущих станков общего назначения построено по закону геометрической прогрессии с постоянным знаменателем ϕ , равным 1,26 или 1,41. Диапазон размеров обрабатываемых деталей или применяемого режущего инструмента для каждого члена ряда, как правило, значительно превышает эту величину. Поэтому существует некоторое перекрытие размерных диапазонов D оборудования у смежных членов параметрического ряда. Оно обеспечивает определенную гибкость станочного парка машиностроительных предприятий, что позволяет им без замены оборудования быстро и практически без снижения производительности переходить на выпуск новой продукции. Однако многократное дублирование отдельных размерных диапазонов на станках одного ряда приво-

дит к увеличению количества его членов и, как следствие, к росту расходов на проектирование, изготовление и эксплуатацию оборудования. Поэтому проблема установления оптимальной структуры параметрических рядов технологического оборудования весьма актуальна.

В работе [86] показано, что функциональную способность i -й технологической системы, определяемую ее параметрами (и характеристиками), можно оценить через так называемый критерий условных средних потерь R_i , обеспечивающих минимум ошибки принятия решения:

$$R_i = RC_i \left[1 - \prod_{j=1}^r p_{ij} \left\{ \frac{DC_j - UC_j}{[\chi_j]} \leq 1 \right\} \right], \quad (1)$$

где RC_i – приведенные затраты; p_{ij} – вероятность отсутствия потерь в технологической системе по j -му параметру; DC_j – проектные возможности оборудования по j -му параметру; UC_j – используемые возможности металлообрабатывающего станка по j -му параметру; $[\chi_j]$ – допустимая величина запаса способностей по j -му параметру. В процессе оптимизации

станочной технологической системы стараются найти минимум указанного выражения [19].

Очевидно, что установление типа структуры параметрического ряда оказывает существенное влияние на запас способностей отдельных его членов. Так, для обеспечения максимальной эффективности гибридного металлообрабатывающего оборудования при его проектировании необходимо стремиться к такому построению технологической системы, при котором запас ее способностей имел бы наименьшее значение. Это требование достаточно хорошо выполняется и реализуется только в условиях массового типа производства. Однако в ситуации мелкосерийного и единичного производства фактор необходимого повышения гибкости технологического оборудования выходит на первый план, вынуждая создавать станки с увеличенным значением допустимой величины запаса способностей, что неизменно приводит к некоторому снижению их эффективности. Решением указанной проблемы, т. е. нахождением варианта наиболее рационального использования гаммы универсальных станков является равенство условных средних потерь для всех членов параметрического ряда

$$R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R_m = \text{const}, \quad (2)$$

где m – количество членов типоразмерного ряда.

При формировании параметрических рядов металлообрабатывающих станков стандартизации подвергается их основной параметр. Например, для токарных станков это диаметр обработки над станиной, а для фрезерного металлообрабатывающего оборудования – ширина стола. В этом случае соотношение между основными параметрами соседних членов ряда и будет определять их нормативный запас способностей. Принимая во внимание данный факт, зависимость (1) может быть трансформирована в целевую функцию вида

$$R = \sum_{i=1}^m RC_i \left[1 - p \left\{ \frac{\Phi_i}{\Phi_i - 1} (1 - \Psi_i) \leq 1 \right\} \right] \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\Psi = UC_i / DC_i$ – коэффициент использования способностей металлообрабатывающего станка.

Поскольку по мере роста основного параметра оборудования происходит увеличение приведенных затрат, то из анализа выражения (3) следует, что равенство условных средних потерь для всех станков гаммы можно обеспечить, если

параметрический ряд будет построен с переменным знаменателем [19, 71]:

$$\Phi_1 > \Phi_2 > \dots > \Phi_i > \dots > \Phi_m. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что значения Φ_i целесообразно изменять в геометрической прогрессии со знаменателем δ .

Дополнительным вариантом решения задачи обеспечения требования (2) для всех членов параметрического ряда является формирование условий, при которых размеры эксплуатируемых режущих инструментов или обрабатываемых деталей X будут приближены к максимально допустимым. Логическим следствием такого условия будет неизбежное уменьшение диапазонов варьирования D параметра X с увеличением габаритов технологического оборудования [19, 71]:

$$D_1 > D_2 > \dots > D_i > \dots > D_m. \quad (5)$$

В свою очередь, способность предприятия достаточно быстро переходить на выпуск новой продукции на базе существующего оборудования (или по крайней мере с минимальной его заменой), т. е. мобильность станочного парка, также должна быть обеспечена при синтезе параметрических рядов. Это дополнительное условие достигается посредством перекрытия размерных диапазонов у отдельных членов параметрического ряда. Однако, как уже отмечалось ранее, многократное дублирование, значительно повышая затраты на изготовление и эксплуатацию станочного оборудования, по существу нивелирует все усилия, направленные на улучшение его мобильности.

Многочисленные статистические исследования в промышленно развитых странах показали, что распределения размеров инструментов и обрабатываемых на металлорежущих станках поверхностей обычно имеют одномодальный характер с положительной асимметрией. Доказано, что для станков определенного типоразмера параметр X обычно имеет логарифмически нормальное распределение [19, 20, 71, 72]:

$$f_i(y) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - \bar{y}_i)^2}{2\sigma_i^2}},$$

где y – натуральный логарифм случайной величины X ; \bar{y}_i – среднее значение (математическое

ожидание) величины y ; σ_i – среднеквадратичное отклонение y от \bar{y}_i .

Из анализа закономерности логнормального распределения (рис. 6) видно, что средняя часть диапазона является основной для i -го типоразмера оборудования, а боковые части служат для дублирования производственных функций смежных членов ряда.

Диапазон варьирования логарифмически нормального распределения целесообразно разбить на три примерно равных интервала (поддиапазона). Тогда в пределах среднего (основного) поддиапазона \bar{a}_i будет обеспечиваться обработка с максимальной производительностью более 2/3 работ. На оба других дублирующих интервала, $a_{i\min}$ и $a_{i\max}$, будет отводиться оставшаяся треть работ (рис. 7). При этом возможно использование оборудования и за пределами данного размерного диапазона, но с некоторой потерей производительности в результате несоответствия технических характеристик станочных систем оптимальным условиям эксплуатации [19, 20, 71, 72].

Подобный принцип формирования параметрического ряда дает возможность производить обработку поверхности любого размера с максимальной производительностью, при этом имеет место трехкратное перекрытие диапазона.

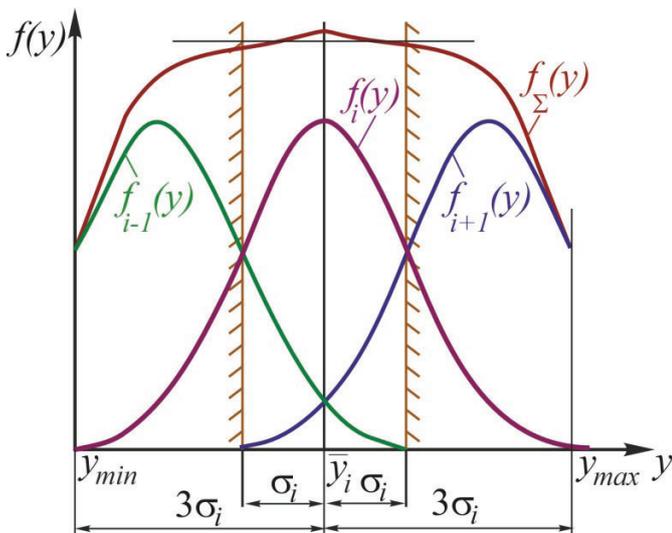


Рис. 6. Логарифмически нормальное распределение размеров инструментов и обрабатываемых на металлорежущих станках поверхностей

Fig. 6. Logarithmically normal distribution of tool sizes and surfaces machined on metal-cutting machines

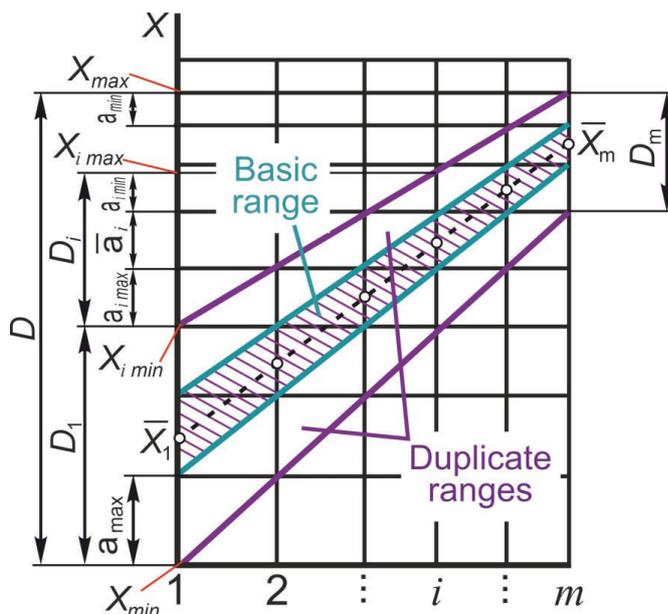


Рис. 7. Изображение предлагаемого параметрического ряда (в логарифмических координатах) с переменным знаменателем:

a_{\max} и a_{\min} – максимальный и минимальный размер интервала; \bar{X}_1 и \bar{X}_m – средние значения параметра X для первого и m -го членов ряда

Fig. 7. Image of the proposed parameter-oriented series (in logarithmic coordinates) with a variable denominator:

a_{\max} and a_{\min} – the maximum and minimum size of the interval; \bar{X}_1 and \bar{X}_m – the average values of the parameter X for the first and m^{th} members of the series

Результаты и их обсуждение

На первом этапе синтеза проводится анализ условий эксплуатации однотипных станков и устанавливается область их рационального использования, т. е. назначаются пределы X_{\min} и X_{\max} варьирования параметра X . Определению же подлежат основные параметры $X_{\max i}$ и количество членов ряда m .

Первоначально назначают минимальный размер интервала и выбирают величину его приращения δ . На практике для обеспечения требуемой точности наиболее предпочтительными значениями являются $a_{\min} = 1,26$ с величиной приращения $\delta = 1,12$. Однако необходимо отметить, что в реальных условиях проектирования допустимы и другие варианты.

Представленные параметры связаны между собой следующим соотношением:

$$D = a_{\min}^z \delta^{(z^2-z)/2}, \quad (6)$$

где z – количество интервалов случайной величины X ; $D = X_{\max}/X_{\min}$ – диапазон варьирования случайной величины X .

Логарифмируя указанное выражение и решая его относительно z , находят количество членов параметрического ряда:

$$m = z - 2. \quad (7)$$

Затем устанавливают значения знаменателей ряда для каждого его члена

$$\varphi_i = a_{\min} \delta^{k_i}, \quad (8)$$

где $k_i = m - i$.

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что с увеличением порядкового номера члена ряда значение φ уменьшается, при этом нахождение основного параметра оборудования будет осуществляться по формуле

$$X_{\max i} = X_{\max} / \varphi_m^{k_i} \delta^{(k_i^2 - k_i)/2}, \quad (9)$$

где φ_m – минимальное значение переменного знаменателя ряда.

Величины базового (среднего) \bar{a}_i и полного D_i диапазонов варьирования размера X каждого из членов параметрического ряда будут рассчитываться согласно следующим зависимостям: $\bar{a}_i = a_{\min} \delta^{k_i+1}$ и $D_i = (\bar{a}_i)^3$.

По полученным данным на графике (рис. 8) наносят граничные линии размерных диапазонов, после чего приступают непосредственно к построению параметрического ряда. Для этого из точки A , соответствующей верхней границе основного поддиапазона первого члена ряда, проводится горизонтальная линия до ее пересечения в точке B с линией, определяющей нижнюю границу поддиапазона. Абсцисса точки B задает основной параметр второго члена ряда. Затем находится верхняя граница основного поддиапазона второго члена ряда (точка C), и процесс повторяется.

Полученные таким образом значения основных параметров следует привести к ближайшим стандартным. Это можно осуществить, незначительно изменив положение граничной линии минимальных значений размерной характеристики.

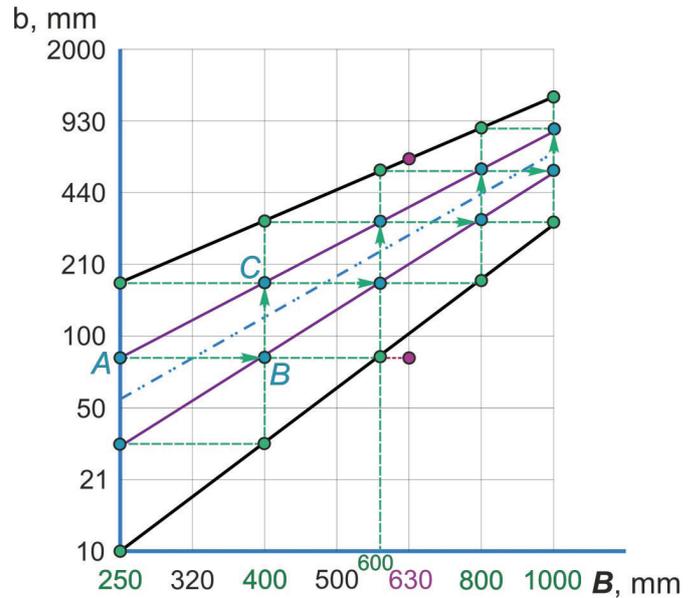


Рис. 8. Перспективный параметрический ряд вертикально-фрезерных станков с крестовым столом, модернизируемых до уровня гибридного технологического оборудования

Fig. 8. A promising parameter-oriented series of vertical milling machines with a cross table, upgraded to the level of hybrid technological equipment

Рассмотренный графоаналитический метод реализован при синтезе перспективного параметрического ряда вертикально-фрезерных станков с крестовым столом (ГОСТ 9726–89). Как показал анализ технических характеристик и условий эксплуатации отечественных фрезерных станков и их зарубежных аналогов, существует определенная корреляционная связь между предельными размерами обрабатываемых деталей и основным параметром оборудования:

$$b_{\max} = 0,4657 B^{1,1059}; \quad \bar{b} = 0,0045 B^{1,7171}, \quad (10)$$

где b_{\max} – максимальная ширина обрабатываемых заготовок на столе станка; \bar{b} – средняя ширина заготовок; B – максимальная ширина рабочей поверхности фрезерного станка.

В результате анализа данных было зафиксировано, что прослеживается четкая тенденция к уменьшению диапазона варьирования размеров габаритов обрабатываемых изделий R_b по мере роста основного параметра станка B :

$$R_b = \frac{22\,082}{B^{1,3027}}. \quad (11)$$

В результате этого при эксплуатации вертикально-фрезерных станков действующего пара-

метрического ряда со знаменателем $\varphi = 1,26$ (ГОСТ 9726–89) [87] имеет место многократное перекрытие отдельных размерных диапазонов, достигающих в определенном интервале размеров девятикратной величины, что, безусловно, отражается на эффективности действующего станочного парка.

Новый параметрический ряд имеет в два раза меньше членов, определяемых ГОСТ 9726–89, и состоит из станков со следующими значениями основного параметра B : 250; 400; 630(600); 800; 1000 мм.

Если построить параметрический ряд на базе действующего, то переход на него может быть осуществлен с незначительными изменениями станкостроительного производства. Новыми являются лишь станки с $B = 600$ мм, созданные посредством минимальной модернизации существующего стандартного оборудования близких типоразмеров. Сократив, таким образом, номенклатуру выпускаемых и модернизируемых станков, получим возможность повышения серийности их производства и снижения текущих расходов на обслуживание и ремонтные работы, при этом сохраняется гибкость станочного парка. Для того чтобы сделать окончательные выводы об экономической целесообразности и эффективности применения предлагаемого параметрического ряда вместо традиционно используемого ранее, необходимо определить величины приведенных затрат для того и другого варианта. Ранее уже отмечалось, что наряду с основным параметром $X_{\max i}$ необходимо оптимизировать и другие основные технические характеристики оборудования. К ним относятся предельные значения частот вращения шпинделя, допустимый на нем крутящий момент и границы использования эффективной мощности. Даже при незначительном изменении структуры параметрического ряда автоматически возникает необходимость изменения указанных выше характеристик.

Обоснование технических характеристик на базе моделирования эксплуатационных параметров станочного оборудования с использованием предлагаемой методологии изложено авторами в работах [17, 19, 20, 71, 72, 75, 88]. В качестве эксплуатационных параметров рассматриваются характеристики приводов станка, значения кото-

рых зависят от режимов обработки, но при этом находятся в рамках диапазона технических характеристик. Поскольку диаметр режущего инструмента (например, диаметр торцевой фрезы) находится в жесткой взаимосвязи с шириной обрабатываемой заготовки, то подход к решению данной проблемы в своей основе имеет прогноз распределения системы указанных случайных величин. Значения распределений скоростей и сил резания при выполнении станком заданных функций являются исходными данными, которые получены статистическим путем при обработке соответствующей информации. В свою очередь, показатели распределения скоростей режущего инструмента, применяемого для обработки заготовки, и размер подвергаемого обработке изделия могут быть рассчитаны по следующим зависимостям:

$$\sigma_i = \frac{\ln \bar{a}_i}{2};$$

$$\overline{\ln X_i} = \ln X_{\max i} + (\ln \delta - 3\sigma_i);$$

$$\bar{X}_i = \exp \left\{ \overline{\ln X_i} + \frac{\sigma_i^2}{2} \right\},$$

где σ_i – среднеквадратичное отклонение случайной величины X ; $\overline{\ln X_i}$ – среднее значение логарифма случайной величины X ; \bar{X}_i – среднее значение величины X .

Достаточно наглядно моделируемая система приведена на рис. 9, где она изображена в виде картины распределений. Здесь значения характеристик показаны в логарифмических координатах: по горизонтали отложены частоты вращения шпинделя n , по вертикали – крутящего момента M , а по диагонали – эффективной мощности N .

На рис. 9 отображаются линии равных вероятностей выполняемых на станке работ и наносятся оптимальные границы предельных значений моделируемых эксплуатационных характеристик. Они соответствуют крайним максимальным значениям второй производной дифференциальных функций $f(y)$ итоговых (результатирующих) распределений характеристик y станка:

$$f(y) = \sum_{q=1}^{\omega} p_q f_q(y),$$

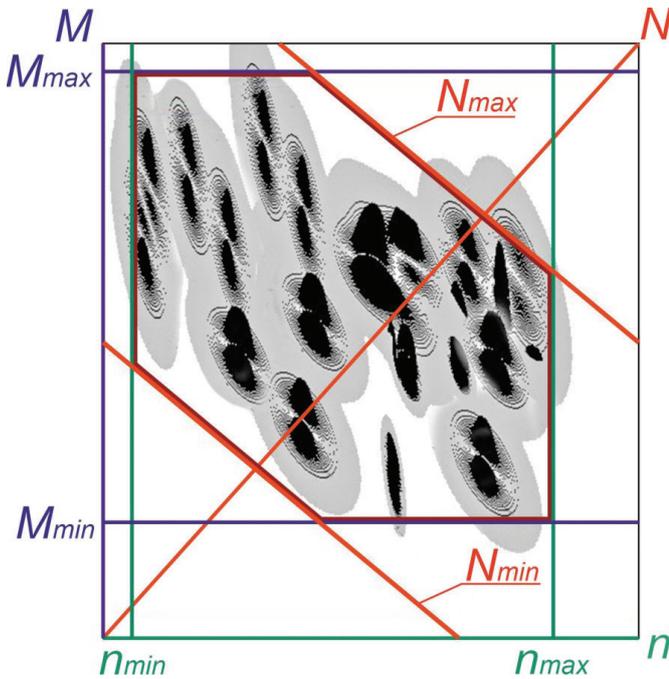


Рис. 9. Картина распределения эксплуатационных характеристик гибридного технологического оборудования

Fig. 9. The distribution pattern of the hybrid process equipment operational characteristics

где p_q – вероятность реализации условий обработки q ; $f_q(y)$ – дифференциальная функция элементарного (частного) распределения характеристики для условия обработки q (y – натуральный логарифм n , M или N); ω – общее количество условий обработки на станке.

Предлагаемая методология отличается от традиционного подхода тем, что позволяет ввести ограничения минимума используемых значений мощности. Такая возможность существенно повышает средний коэффициент мощности двигателя ($\cos \varphi$) и снижает расход энергии.

Значения характеристик, полученные указанным способом, в дальнейшем при необходимости корректируются на основании стандартных рядов предпочтительных чисел, типовых значений мощности электродвигателей и др.

Поскольку оптимизация технических характеристик осуществляется по производительности станка, то значения этих характеристик на стадии моделирования для большего удобства выбираются в соответствии с результатами расчета процентной составляющей работ, выполня-

емых на станке при максимальной производительности с учетом установленных ограничений эксплуатационных параметров.

Заключение

Представлена оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. Результаты исследований показали, что в большинстве случаев параметрические (типоразмерные) ряды металлорежущих станков общего назначения с постоянными знаменателями, построенные в соответствии с законом геометрической прогрессии, приводят к необходимости дублирования отдельных размерных диапазонов на станках одного ряда и, как следствие, к нецелесообразному увеличению количества его членов. В связи с этим растут расходы на проектные работы, изготовление и эксплуатацию оборудования. В случае применения параметрического ряда, построенного с использованием переменного знаменателя, достигается максимальная эффективность гибридного металлообрабатывающего оборудования, что теоретически доказано. Благодаря применению подобного принципа формирования параметрического ряда появляется возможность обеспечения практически равной вероятности обработки с максимальной производительностью поверхностей различных размеров при трехкратном перекрытии диапазонов.

Произведена апробация методики формирования структуры параметрических рядов. Установлено, что при эксплуатации вертикально-фрезерных станков действующего параметрического ряда со знаменателем $\varphi = 1,26$ (ГОСТ 9726–89) имеет место многократное перекрытие отдельных размерных диапазонов, достигающих в определенном интервале размеров девятикратной величины, что, безусловно, отражается на эффективности действующего станочного парка. Синтез перспективного параметрического ряда вертикального фрезерного станка с крестовым столом показал, что для нового параметрического ряда характерно наличие меньшего количества членов. Таким образом, применение предлагаемой методики позволяет сократить номенклатуру выпускаемых и модернизируемых станков, что в свою очередь приведет к повыше-

нию серийности производства, снижению затрат на ремонт и техобслуживание оборудования, но при этом позволит сохранить гибкость станочного парка.

Список литературы

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

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

3. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2006. – Vol. 220, iss. 12. – P. 2055–2067. – DOI: 10.1243/09544054JEM562.

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

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

6. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718 / J. Widłaszewski, M. Nowak, Z. Nowak, P. Kurp // *Physical Sciences Forum*. – 2022. – Vol. 4, iss. 1. – P. 26. – DOI: 10.3390/psf2022004026.

7. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

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

9. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium // *Advances Engineering Materials*. – 2008. – Vol. 10, iss. 6. – P. 565–572. – DOI: 10.1002/adem.200700349.

10. Madhavulu G., Ahmed B. Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations // *Journal of Materials Processing*

Technology. – 1994. – Vol. 44. – P. 199–206. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.

11. Parida A.K., Maity K. Experimental investigation on tool life and chip morphology in hot machining of Monel-400 // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2018. – Vol. 21, iss. 3. – P. 371–379. – DOI: 10.1016/j.jestch.2018.04.003.

12. Özler L., Inan A., Özel C. Theoretical and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41, iss. 2. – P. 163–172. – DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00077-8.

13. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V) / S. Ul Hasan, S. Ali, S.H.I. Jaffery, E. Ud Din, A. Mubashir, M. Khan // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 21. – P. 4398–4408. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.

14. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212, iss. 3. – P. 601–613. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.

15. Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel // *Wear*. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 518–530. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.

16. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials // *Procedia Manufacturing*. – 2016. – Vol. 5. – P. 1337–1347. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.

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

18. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of inconel 718 using Nd:YAG laser source // *Journal of Advanced Research*. – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P. 407–423. – DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.

19. Skeebe V.Yu. Parametric optimization of hybrid metalworking machinery quality // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 378. – P. 012030. – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012030.

20. Skeebe V.Yu., Skeebe P.Yu. Determining the operational loads of the hybrid metalworking machines drive // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 378. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012031.

21. Макаров В.М. Комплексованные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.
22. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan / M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura, eds. – London: Springer, 2008. – 556 p. – ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
23. 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.
24. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
25. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals. – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
26. Brecher C., Özdemir D. Integrative production technology: theory and applications. – [S. l.]: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – ISBN 978-3-319-47452-6. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.
27. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
28. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.
29. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.
30. Laser assisted machining: a state of art review / G. Punugupati, K.K. Kandi, P.S.C. Bose, C.S.P. Rao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 149. – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.
31. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium / M. Olsson, V. Akujärvi, J.-E. Ståhl, V. Bushlya // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 97. – P. 105520. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.
32. Ginta T.L., Amin A.K.M.N. Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2013. – Vol. 14, iss. 2. – P. 194–212. – DOI: 10.1504/IJMMM.2013.055737.
33. Boivie K., Karlsten R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // South African Journal of Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.
34. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing / Y. Yang, Y. Gong, S. Qu, Y. Rong, Y. Sun, M. Cai // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97, iss. 5–8. – P. 2687–2696. – DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.
35. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
36. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, iss. 1. – P. 106–114. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.
37. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Совмещение операций поверхностной закалки и финишного шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 1 (30). – С. 16–18.
38. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.
39. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish / K.R. Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68, iss. 1. – P. 113–116. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.
40. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhrushev, K.A. Parts, G.O. Cha // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022038. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.
41. Salonitis K., Chondros T., Chryssoulouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. – DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.

42. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Гибридное металлореобрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.

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

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

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

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

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

48. *Kim E.-J., Lee C.-M., Kim D.-H.* The effect of post-processing operations on mechanical characteristics of 304L stainless steel fabricated using laser additive manufacturing // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 1370–1381. – DOI: DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.142.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

63. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic / Z. Ma, Z. Wang, X. Wang, T. Yu // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, iss. 1. – P. 921–929. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.
64. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebea // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 25. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
65. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 115. – P. 104632. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.
66. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder / M. Areitioaurtena, U. Segurajaurregi, I. Urresti, M. Fisk, E. Ukar // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 87. – P. 545–550. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.
67. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator / F. Li, X. Li, T. Wang, Y.(K.) Rong, S.Y. Liang // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2020. – Vol. 172. – P. 105393. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.
68. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2022. – Vol. 27. – P. 101006. – DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.
69. Hybrid modeling of induction hardening processes / M.Z. Asadzadeh, P. Raninger, P. Prevedel, W. Ecker, M. Mücke // *Applications in Engineering Science*. – 2021. – Vol. 5. – P. 100030. – DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.
70. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening / V. Javaheri, O. Haiko, S. Sadeghpour, K. Valtonen, J. Kömi, D. Porter // *Wear*. – 2021. – Vol. 476. – P. 203678. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.
71. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 2 (59). – С. 33–38.
72. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.
73. Федотенко А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 408 с.
74. Птицын С.В., Левицкий Л.В. Структурный анализ и синтез кинематики металлорежущих станков. – Киев: УМК ВО, 1989. – 70 с.
75. Повышение эффективности проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую операции: отчет о научно-исследовательской работе по проекту № 9.11829.2018/11.12 / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцовский, О.В. Нос, Е.А. Зверев, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев, Ю.В. Вацаг, К.А. Титова, Г.О. Ча, П.Ю. Скиба. – № ГР АААА-А18-118062290029-8. – Новосибирск, 2018. – 197 с.
76. Казанцев М.Е. Построение структурных схем станков и настройки исполнительных движений. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – 54 с.
77. Ивахненко А.Г. Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1998. – 244 с.
78. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.Y. Erenkov, E.O. Ivakhnenko, A.V. Oleinik // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, N 10. – P. 901–905. – DOI: 10.3103/S1068798X17100112.
79. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.
80. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2012. – 365 с.
81. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: основы компонентики. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
82. Ивахненко А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.
83. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–I – Analysis of requirements and specifications / M. Nakaminami, T. Tokuma, M. Moriwaki, K. Nakamoto // *International Journal of Automation Technology*. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 78–86. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.
84. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–II – Investigation of basic structure / M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, M. Moriwaki, K. Nakamoto // *International Journal of Automation Technology*. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 87–93. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

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

86. Григорян Г.Д. Надежность гибких технологических систем в условия безлюдной технологии. – Одесса: Изд-во ОПИ, 1985. – 104 с.

87. ГОСТ 9726–89. Станки фрезерные вертикальные с крестовым столом. Терминология. Основные размеры. Нормы точности и жесткости. – М.: Стандартинформ, 1989. – 41 с.

88. Чёсов Ю.С., Птицын С.В. Проектирование металлорежущего оборудования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 105 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source

Vadim Skeebea ^{a, *}, Egor Zverev ^{1, b}, Pavel Skeebea ^{2, c}, Aleksey Chernikov ^{3, 1, d}, Andrey Popkov ^{1, e}

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

² JSC “Novosibirsk switch plant”, 7 Aksenov str., Novosibirsk, 630025, Russian Federation

³ LLC “GLK-Industrial Technologies”, 177 Bolshevistskaya st., shop 16, Novosibirsk, 630083, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebea_vadim@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4405-6623>, egor_z@ngs.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-0327-992X>, Pavel_skeebea_ptm@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>, aleksey.chernikov.97@mail.ru,

^e <https://orcid.org/0009-0006-5587-9990>, andrey.popkov.2013@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 March 2023

Revised: 17 April 2023

Accepted: 15 May 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Hybrid equipment

Multipoint machining

High energy heating

Cutting

Induction hardening

Funding

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

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Improving the competitiveness of manufactured products is impossible without achieving high rates of resource and energy saving, while providing modern machine tools with the proper level of production flexibility in combination with guaranteed high values of processing productivity and the required level of parts manufacturing quality. Insufficient or excess capacity of technological equipment leads to a decrease in its economic efficiency, an increase in capital costs and, as a result, an increase in the cost of production. In the machine tool industry, which is a strategically significant and basic industry for the modernization of mechanical engineering, there is a special interest in the development of a new type of technological equipment that makes it possible to implement methods for modifying the surface layers of parts by processing it with concentrated energy sources. The combination of two processing technologies (mechanical and surface-thermal operations) in the conditions of integrated equipment makes it possible to level the shortcomings of monotecnologies and obtain new effects that are unattainable when using technologies separately. Ensuring an optimal level of quality — one of the unconditional requirements of a market economy — is a priority when developing the overall concept of technological equipment. Thus, it should be noted that the required and specific set of consumer properties are laid down during the design. And, therefore, the problem of quality optimization belongs to the field of forecasting and should be comprehensively addressed at the initial stage of developing the concept of technological equipment. The purpose of this research is to rationally choose the objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source. **Methods:** Theoretical studies of the possible structural composition and layout of hybrid equipment during the integration of mechanical and surface-thermal processes were carried out taking into account the main provisions of structural synthesis and components of metal-cutting systems. During the research, issues related to the main provisions of system analysis, the geometric theory of surface formation, the design of metal-cutting equipment, methods of mathematical and computer modeling were raised. **Results and discussion.** Theoretical studies is found that currently, most of the parameter-oriented (dimension) series of general-purpose metal-cutting machines, built according to the law of geometric progression with a constant denominator, are the cause of multiple duplication of individual size ranges on machines of the same series. This gives grounds to talk about an unreasonable increase in the number of its members and, as a result, to an increase in the cost of designing, manufacturing and operating equipment. The authors adhere to the point of view that in order to ensure maximum efficiency of hybrid metal-cutting equipment, it is necessary to implement a parameter-oriented series built with a variable denominator. Such a principle of forming a parameter-oriented series makes it possible to provide an almost equal probability of processing a surface of any size with maximum productivity with a threefold overlap of ranges. Approbation of the technique for forming the structure of parametric series is carried out. It is theoretically proven that during the operation of vertical milling machines of the operating parameter-oriented series with the denominator $\varphi = 1.26$ (GOST 9726-89), there is a multiple overlap of individual size ranges, reaching a ninefold value in a certain range of sizes, which, of course, affects the efficiency of the existing machine tool holding. In turn, when synthesizing a promising parametric series of vertical milling machines with a cross table, it was shown that the new parameter-oriented series has a smaller number of members. Reducing the range of manufactured and modernized machine tools will increase the serial production and reduce current expenses on repairs and maintenance. Moreover, this effect is achieved while maintaining the flexibility of the machine tool holding.

For citation: Skeebea V.Yu., Zverev E.A., Skeebea P.Yu., Chernikov A.D., Popkov A.S. Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 45–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67. (In Russian).

* Corresponding author

Skeebea Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeebea_vadim@mail.ru

References

1. Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T. Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, vol. 27, iss. 12, pp. 1149–1164. DOI: 10.1007/BF00326472.
2. You K., Yan G., Luo X., Gilchrist M.D., Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 677–692. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.
3. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, iss. 12, pp. 2055–2067. DOI: 10.1243/09544054JEM562.
4. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 8, pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.
5. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinerhiya gibridnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.
6. Widłaszewski J., Nowak M., Nowak Z., Kurp P. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718. *Physical Sciences Forum*, 2022, vol. 4, iss. 1, p. 26. DOI: 10.3390/psf2022004026.
7. Skeeba V.Yu. Gibridnoetekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobratyvyayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
8. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibridnaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnoprofil'nykh izdelii [Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.
9. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium. *Advances Engineering Materials*, 2008, vol. 10, iss. 6, pp. 565–572. DOI: 10.1002/adem.200700349.
10. Madhavulu G., Ahmed B. Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, vol. 44, pp. 199–206. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.
11. Parida A.K., Maity K. Experimental investigation on tool life and chip morphology in hot machining of Monel-400. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, vol. 21, iss. 3, pp. 371–379. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.04.003.
12. Özler L., İnan A., Özel C. Theoretical and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, iss. 2, pp. 163–172. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00077-8.
13. Ul Hasan S., Ali S., Jaffery S.H.I., Ud Din E., Mubashir A., Khan M. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V). *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 4398–4408. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.
14. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, iss. 3, pp. 601–613. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.
15. Birmingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear*, 2015, vol. 328–329, pp. 518–530. DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.
16. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials. *Procedia Manufacturing*, 2016, vol. 5, pp. 1337–1347. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.
17. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obratyvyayushchikh tekhnologii, integriruemykh na edinoi stanochnoi baze [Improving the efficiency of surface-thermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/199463092021.23.34571.

18. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of inconel 718 using Nd:YAG laser source. *Journal of Advanced Research*, 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 407–423. DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.
19. Skeebeba V.Yu. Parametric optimization of hybrid metalworking machinery quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 378, p. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012030.
20. Skeebeba V.Yu., Skeebeba P.Yu. Determining the operational loads of the hybrid metalworking machines drive. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 378, p. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012031.
21. Makarov V.M. Kompleksirovannyye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
22. Mitsubishi M., Ueda K., Kimura F., eds. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan. London, Springer, 2008. 556 p. ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
23. 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.
24. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mcintosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
25. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, iss. 1, pp. 433–436. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
26. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: theory and applications*. Springer International Publ., 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. ISBN 978-3-319-47452-6. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.
27. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
28. Skeebeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.
29. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.
30. Punugupati G., Kandi K.K., Bose P.S.C., Rao C.S.P. Laser assisted machining: a state of art review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 149, p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.
31. Olsson M., Akujärvi V., Ståhl J.-E., Bushlya V. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 97, p. 105520. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.
32. Ginta T.L., Amin A.K.M.N. Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2013, vol. 14, iss. 2, pp. 194–212. DOI: 10.1504/IJMMM.2013.055737.
33. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 106–115.
34. Yang Y., Gong Y., Qu S., Rong Y., Sun Y., Cai M. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, iss. 5–8, pp. 2687–2696. DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.
35. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebeba V.Yu. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, p. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
36. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2009.09.001.
37. Ivancivsky V.V., Skeebeba V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskom oborudovanii [Combining the operations of surface hardening and finish grinding on the same processing equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2006, no. 1 (30), pp. 16–18.

38. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie: povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei pri integratsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-7782-3690-5.
39. Berenji K.R., Karagüzel U., Özlü E., Budak E. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, iss. 1, pp. 113–116. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.
40. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V., Parts K.A., Cha G.O. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022038. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.
41. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.
42. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie. Tekhnologicheskie aspekty integratsii operatsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 348 p. ISBN 978-5-7782-3988-3.
43. Witte J., Huebler D., Schroeffer D., Boerner A., Kannengiesser T. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling. *Wear*, 2023, vol. 522, p. 204722. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.
44. Kim J., Zani L., Abdul-Kadir A., Roy A., Baxevanakis K.P., Jones L.C.R., Silberschmidt V.V. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 86, pp. 109–125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.
45. Xu M., Wei R., Li C., Ko T.J. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 85, pp. 1116–1132. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.
46. Lv B., Lin B., Cao Z., Liu W., Wang G. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89, pp. 371–383. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.
47. Jeon Y., Lee C.M. Current research trend on laser assisted machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, iss. 2, pp. 311–317. DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.
48. Kim E.-J., Lee C.-M., Kim D.-H. The effect of post-processing operations on mechanical characteristics of 304L stainless steel fabricated using laser additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 1370–1381. DOI: DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.142.
49. Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M. A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 748–753. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.
50. Dumitrescu P., Koshy P., Stenekes J., Elbestawi M.A. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 46, iss. 15, pp. 2009–2016. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.
51. Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P. Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – a comprehensive review. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 1626–1636. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.
52. Brecher C., Emonts M., Rosen C.-J., Hermani J.-P. Laser-assisted milling of advanced materials. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.
53. Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R. A thermal simulation model for laser-assisted milling. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 353–362. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.
54. Kim I.-W., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 636–645. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.
55. Choi Y.H., Lee C.M. A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pp. 463–476. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.
56. Woo W.S., Lee C.M. A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, vol. 5, iss. 5, pp. 593–604. DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.

57. Ha J.-H., Lee C.-M. A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 7, p. 1032. DOI: 10.3390/ma12071032.
58. Kim E.J., Lee C.M. A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 2, p. 233. DOI: 10.3390/ma12020233.
59. Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 499–508. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.
60. Kim E.-J., Lee C.-M. Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 411–420. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.
61. Xu D., Liao Z., Axinte D., Sarasua J.A., M'Saoubi R., Wretland A. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy. *Materials and Design*, 2020, vol. 194, p. 108851. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.
62. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.
63. Ma Z., Wang Z., Wang X., Yu T. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 1, pp. 921–929. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.
64. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebea P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 25, p. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
65. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 115, p. 104632. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.
66. Areitioaurtena M., Segurajauregi U., Urresti I., Fisk M., Ukar E. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 545–550. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.
67. Li F., Li X., Wang T., Rong Y.(K.), Liang S.Y. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 172, p. 105393. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.
68. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, vol. 27, p. 101006. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.
69. Asadzadeh M.Z., Raninger P., Prevedel P., Ecker W., Mücke M. Hybrid modeling of induction hardening processes. *Applications in Engineering Science*, 2021, vol. 5, p. 100030. DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.
70. Javaheri V., Haiko O., Sadeghpour S., Valtonen K., Kömi J., Porter D. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening. *Wear*, 2021, vol. 476, p. 203678. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.
71. Ptitsyn S.V., Skeebea V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V. Nadezhnost' prognoza kachestva tekhnologicheskogo oborudovaniya [Reliability prediction of quality process equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 2 (59), pp. 33–38.
72. Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.
73. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 408 p.
74. Ptitsyn S.V., Levitskii L.V. *Strukturnyi analiz i sintez kinematiki metallovezhushchikh stankov* [Structural analysis and kinematics synthesis of machine tools]. Kiev, UMK Publ., 1989. 70 p.
75. Skeebea V.Yu., Ivantsivsky V.V., Nos O.V., Zverev E.A., Martynova T.G., Vakhrushev N.V., Vanag Yu.V., Titova K.A., Cha G.O., Skiba P.Yu. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya gibridnogo metalloobratyvyayushchego oborudovaniya, ob"edinyayushchego mekhanicheskuyu i poverkhnostno-termicheskuyu operatsii* [Improving the efficiency of the conceptual design of the integrated metal-cutting equipment, combining mechanical and surface thermal operation]. Report on the research work of the project N 9.11829.2018/11.12. State registration no. AAAA-B19-219020690026-1, 2018. 197 p.
76. Kazantsev M.E. *Postroenie strukturnykh skhem stankov i nastroiiki ispolnitel'nykh dvizhenii* [Construction of block diagrams of machine tools and adjustment of executive movements]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1997. 54 p.

77. Ivakhnenko A.G. *Povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya metallozhushchikh stankov na osnove strukturnogo sinteza formoobrazuyushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the early stages of designing machine tools based on the structural synthesis of shaping systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1998. 244 p.

78. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Y., Ivakhnenko E.O., Oleinik A.V. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 901–905. DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

79. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. *Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem* [Structural-parametric synthesis of technological systems]. Kursk, KurskSTU Publ., 2010. 151 p.

80. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallozhushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.

81. Vragov Yu.D. *Analiz komponovok metallozhushchikh stankov (Osnovy komponentiki)* [Analysis of the layout of machine tools. The basics of compositing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.

82. Ivakhnenko A.G. *Kontseptual'noe proektirovanie metallozhushchikh sistem. Strukturnyi sintez* [Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998. 124 p.

83. Nakaminami M., Tokuma T., Moriwaki M., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–I – Analysis of requirements and specifications. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 78–86. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

84. Nakaminami M., Tokuma T., Matsumoto K., Sakashita S., Moriwaki T., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–II – Investigation of basic structure. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 87–93. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

85. Mekid S., ed. *Introduction to precision machine design and error assessment. Mechanical and Aerospace Engineering Series*. Boca Raton, CRC Press, 2008. 302 p. ISBN 0849378869. ISBN 978-0849378867.

86. Grigoryan G.D. *Nadezhnost' gibkikh tekhnologicheskikh sistem v usloviya bezlyudnoi tekhnologii* [Reliability of flexible technological systems in the conditions of deserted technology]. Odessa, OPI Publ., 1985. 104 p.

87. GOST 9726–89. *Stanki frezernye vertikal'nye s krestovym stolom. Terminologiya. Osnovnye razmery. Normy tochnosti i zhestkosti* [State standard 9726–89. Vertical milling machines with compound table. Terminology. Basic dimensions. Standards of accuracy and rigidity]. Moscow, Standartinform Publ., 1989. 41 p.

88. Chesov Yu.S., Ptitsyn S.V. *Proektirovanie metallozhushchego oborudovaniya* [Design of metal-cutting equipment]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 105 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



In-situ анализ многослойных покрытий ZrN/CrN в процессе термического воздействия

Андрей Воронцов^{1, a, *}, Андрей Филиппов^{1, b}, Николай Шамарин^{1, c}, Евгений Москвичев^{1, d},
 Ольга Новицкая^{1, e}, Евгений Княжев^{1, f}, Юлия Денисова^{2, g}, Андрей Леонов^{2, h}, Владимир Денисов^{2, i}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

² Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, г. Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>, vav@ispms.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>, andrey.v.filippov@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>, shnn@ispms.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>, em_tsu@mail.ru,
^e <https://orcid.org/0000-0003-1043-4489>, nos@ispms.tsc.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>, zhenya4825@gmail.com,
^g <https://orcid.org/0000-0002-3069-1434>, yukolubaeva@mail.ru, ^h <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>, laa-91@yandex.ru,
ⁱ <https://orcid.org/0000-0002-5446-2337>, volodyadenisov@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.45.038.7

История статьи:

Поступила: 15 марта 2023

Рецензирование: 22 марта 2023

Принята к печати: 28 марта 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Покрытие
 Нитриды
 Фазовый состав
 РСА
 КЛТР
 Напряжения

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 1.1.16.

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные твердые покрытия сочетают в себе разные свойства, такие как высокая твердость, износостойкость, коррозионная стойкость. В настоящее время послойно нанесенные нитриды циркония и хрома являются перспективными материалами для твердых покрытий. Однако процесс нанесения многослойных покрытий не описан в литературе в достаточном для понимания всех происходящих процессов объеме. Проблема заключается в сложности нанесения толстых слоев многослойных многокомпонентных покрытий с различными физическими характеристиками компонент покрытия. В первую очередь это касается коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР). Поскольку процесс нанесения и эксплуатации покрытий заключается в термическом воздействии, то компоненты покрытия с разным КЛТР со временем будут подвержены растрескиванию и дальнейшему разрушению, что приводит к выходу изделий из строя. **Целью работы** является in-situ исследование многослойных покрытий ZrN/CrN посредством рентгеноструктурного анализа с использованием синхротронного излучения и изучение качественного поведения микронапряжений многослойных покрытий, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом на подложку из сплава ВК8 при термическом воздействии до 750 °С. **Методика исследования.** В работе исследованы образцы покрытий из нитридов хрома и циркония, нанесенные на подложки из твердого сплава ВК8. Основопологающим методом в работе является рентгеноструктурный анализ с использованием синхротронного излучения. Применены наиболее распространенные методики для изучения характеристик многослойных покрытий, таких как коэффициент линейного температурного расширения, и качественное определение микронапряжений II рода исследуемых покрытий. **Результаты и их обсуждение.** Результатом является обеспечение возможности определения в процессе нагрева изменений характеристик многослойных покрытий, таких как изменение параметра кристаллической решетки каждой из компонент покрытия по отдельности, возможности определения коэффициента теплового расширения компонент покрытия и качественного определения микронапряжений, а также возможности формирования рекомендаций на основе проведенного анализа к дальнейшему применению технологии нанесения многослойных покрытий с заданными характеристиками.

Для цитирования: In-situ анализ многослойных покрытий ZrN/CrN в процессе термического воздействия / А.В. Воронцов, А.В. Филиппов, Н.Н. Шамарин, Е.Н. Москвичев, О.С. Новицкая, Е.О. Княжев, Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, В.В. Денисов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 68–80. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-68-80.

*Адрес для переписки

Воронцов Андрей Владимирович, м.н.с.
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (983) 239-34-17, e-mail: vav@ispms.ru

Введение

С развитием технологии производства материалов при изготовлении режущих инструментов, пресс-форм, деталей двигателей и других механических компонентов в основном применяются твердые покрытия [1, 2]. В качестве материалов покрытий в первую очередь используются нитриды металлов, таких как хром, ниобий, цирконий, тантал, титан, или их комбинации [3–5]. Такие покрытия способны выдерживать высокую нагрузку и температуру, в условиях которых работает режущий инструмент. Стоит отметить, что покрытия используются не только для обеспечения режущего инструмента необходимыми характеристиками. Как показывают исследования, некоторые материалы, например CrN, применимы в качестве покрытия циркониевого сплава для использования в материалах, устойчивых к авариям топлива [6, 7], а ZrC/TaC, Ru–Al/Ru–Si–Zr находят применение в авиационной промышленности – в частности, при изготовлении лопаток газотурбин [8, 9].

При этом основными способами нанесения покрытий можно назвать реактивное магнетронное распыление [3, 10], вакуумную пайку [11], термическое напыление [12], высокоскоростное физическое осаждение из паровой фазы [13, 14] и импульсное электроосаждение [15]. В настоящей работе применялся метод вакуумно-дугового плазменного осаждения [16].

Несмотря на широкое использование нитридных покрытий при изготовлении режущего инструмента, исследуются и границы применения этих покрытий, а также свойства, приобретенные после определенного воздействия на материал покрытий. В большинстве случаев исследуются коррозионная стойкость [17] и процессы оксидирования [10, 18] при температурах более 1000 °C. Авторы работы [17] выяснили, что многослойные покрытия Cr/CrN на подложке циркониевого сплава Zr-4 демонстрируют хорошую стойкость к окислению паром с уменьшением толщины слоев многослойного покрытия. Однако первостепенные задачи охарактеризования процесса нанесения многослойных покрытий в литературе не описаны. Проблема заключается в сложности нанесения толстых слоев многослойных многокомпонентных покрытий с различными физическими характеристиками. В первую

очередь это касается коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) компонент многослойного покрытия. Поскольку процесс нанесения и эксплуатации покрытий заключается в термическом воздействии, то компоненты покрытия с разным КЛТР со временем будут подвержены растрескиванию и дальнейшему разрушению, что приводит к выходу изделий из строя.

Во взаимосвязи перечисленные работы дают понять, что важно знать не только характеристики и свойства нитридных покрытий, но и кинетику структурного поведения многослойных покрытий, получаемых в результате термического воздействия на воздухе. Поэтому целью настоящей работы является in-situ исследование закономерностей структурных изменений многослойных покрытий CrN/ZrN, нанесенных на подложку BK8 (8 % вес. Co, WC – остальное) методом вакуумно-дугового плазменного осаждения после термических испытаний на воздухе с температурой воздействия от 30 до 750 °C. Проведенные исследования будут полезны для формирования знаний о поведении материалов с различными физическими свойствами в составе многослойных покрытий при повышенных температурах эксплуатации покрытий в инженерных приложениях, например, режущего инструмента. В основу работы поставлена задача исследования структурно-фазового состава многослойных покрытий CrN/ZrN в процессе нагрева подложки сплава BK8 с нанесенным многослойным покрытием чередующимися нитридными слоями CrN и ZrN.

Целью данной работы является in-situ исследование многослойных покрытий ZrN/CrN посредством рентгеноструктурного анализа с использованием синхротронного излучения, а также изучение качественного поведения микронапряжений многослойных покрытий, полученных плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом на подложку из сплава BK8 при термическом воздействии до 750 °C. Результатом является обеспечение возможности определения в процессе нагрева изменений характеристик многослойных покрытий, таких как изменение параметра кристаллической решетки каждой из компонент покрытия по отдельности, возможности определения коэффициента теплового расширения компонент покрытия и качественного определения микронапряжений, а также

возможности формирования рекомендаций на основе проведенного анализа к дальнейшему применению технологии нанесения многослойных покрытий с заданными характеристиками.

Методика исследований

В качестве экспериментальных образцов, подвергающихся нагреву в процессе проведения синхротронных исследований, использовали образцы с многослойным покрытием ZrN/CrN, нанесенным на подложку из стали ВК8 плазменно-ассистированным вакуумно-дуговым методом, полученные при разной скорости вращения стола и подложкодержателя в планетарной схеме нанесения покрытий, показанной на рис. 1. Для эксперимента были выбраны два режима нанесения покрытий: скорость вращения стола 0,5 об/мин (образец ZrN/CrN-0,5) и 8,0 об/мин (образец ZrN/CrN-8).

Подложки из сплава ВК8 для напыления многослойных покрытий закрепляются в камере 1 на вращающемся держателе 2, установленном на вращающемся столе 3. Турбомолекулярным насосом 4 создается вакуум в камере 1. После достижения давления 10^{-4} Па происходит напуск нейтрального рабочего газа через плазменный источник 5 для обеспечения формирования в камере рабочего давления требуемого уровня.

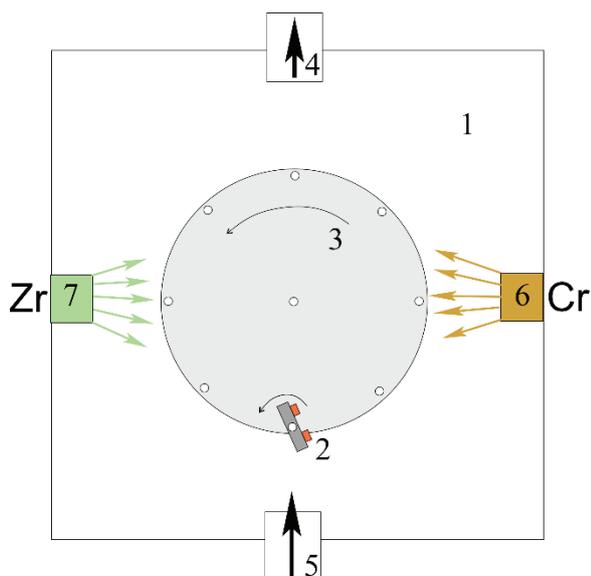


Рис. 1. Схема установки для нанесения многослойных наноструктурированных покрытий ZrN/CrN

Fig. 1. Multilayer nanostructured ZrN/CrN coating application unit scheme

При зажигании газового разряда с током 40 А и приложении напряжения смещения 700 В к подложкодержателю с образцами осуществлялся нагрев подложек до 400 °С. После очистки поверхности объектов исследования ионной бомбардировкой и её химической активации производился напуск смеси газов азота и аргона (90/10) до заданного давления и зажигание разрядов дуговых испарителей с током 80 А для каждого из них. В каждом отдельно взятом испарителе было установлено по одному катоду из напыляемого материала (позиции 6 и 7), в нашем случае это были Cr (99,9 %) и Zr (99,5 %).

Полученные образцы с многослойными покрытиями имели форму круга диаметром 15 мм и толщиной 3 мм, толщина покрытий составляла во всех случаях 5 мкм.

Наиболее подходящим методом исследования поставленной задачи был выбран способ *in-situ* синхротронных исследований характеристик многослойных покрытий в процессе термического воздействия на многослойное покрытие, нанесенное на подложку. Покрытия, нанесенные на подложку из сплава ВК8, исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с использованием синхротронного излучения (работы были произведены на СИ ВЭПП-3). Длина волны при синхротронных исследованиях равнялась 1,54 Å. Для *in-situ* исследований образец с многослойным покрытием устанавливался на нагреваемый держатель в воздушной атмосфере. Затем следовало построение исходной рентгенограммы методом асимметричной съемки, т. е. с фиксированным углом падения излучения, в диапазоне углов 2Θ , выбранном в зависимости от материала многослойного покрытия (31–48 градусов).

На следующем этапе производился нагрев образца с заданной скоростью повышения температуры, обеспечивающей время экспозиции, достаточное для поэтапного построения рентгенограммы образца с многослойным покрытием с использованием синхротронного излучения в диапазоне температур нагрева, обусловленном реальными условиями эксплуатации покрытий. Одновременно велась регистрация и запись рентгенограмм с шагом, дающим достаточную точность идентификации фазовых переходов и структурных изменений при нагреве покрытия в диапазоне температур от 30 до 750 °С. Для обе-

спечения необходимой точности измерений регистрировалась часть диапазона углов 2Θ , в которой присутствовало по одному рефлексу каждой фазы многослойного покрытия. Нагрев образца с многослойным покрытием осуществлялся в диапазоне температур от 30 до 750 °C со скоростью повышения температуры не более 5 °C/мин, обеспечивающей время экспозиции, достаточное для построения рентгенограммы образца. При этом с шагом 10 °C осуществлялась регистрация и запись рентгенограмм с использованием синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне с шагом сканирования 0,05 градуса и диапазоне углового положения сканирования 2Θ от 31 до 48 градусов.

После получения необходимого количества рентгенограмм при различных температурах проводилась аппроксимация профилей рентгенограмм с определением таких характеристик рефлексов присутствующих фаз, как межплоскостные расстояния рефлексов (d) и ширина рефлексов на полувысоте (FWHM), а также идентификация всех фаз многослойного покрытия в пределах рентгенограмм, выбранных из всего массива полученных рентгенограмм после визуальной оценки температуры начала фазовых превращений. Для нахождения характеристик рефлексов, присутствующих в покрытии фаз, профили рентгенограмм аппроксимировались функцией Pseudo-Voigt [19].

После определения всех необходимых параметров профиля рентгенограммы рассчитывался параметр кристаллической решетки a для кубической сингонии фаз CrN и ZrN, присутствующих в многослойном покрытии, и коэффициента температурного расширения (ЛКТР) для каждой фазы на всех этапах диапазона температур нагрева. На основе полученных данных выполнялось построение зависимости величины параметра кристаллической решетки a для каждой фазы многослойного покрытия от температуры воздействия, при которой находился образец с многослойным покрытием на каждом этапе диапазона температур нагрева, а также построение зависимости изменения параметра кристаллической решетки Δa и графическое определение из последней коэффициента температурного расширения.

Количественное определение параметра кристаллической решетки a производилось после

аппроксимации и нахождения межплоскостных расстояний d по следующей формуле [20]:

$$a = d\sqrt{H^2 + K^2 + L^2}, \quad (1)$$

где d – межплоскостное расстояние, Å; H, K, L – индексы Миллера анализируемого рефлекса.

Руководствуясь вычисленными по формуле (1) параметрами кристаллической решетки компонент многослойного покрытия, можно рассчитать ЛКТР каждой компоненты многослойного покрытия по отдельности:

$$\beta = \frac{\Delta a}{a\Delta T}, \quad (2)$$

где β – ЛКТР, K^{-1} ; a – параметр кристаллической решетки, нм; Δa – изменение параметра кристаллической решетки, нм, при изменении температуры образца с многослойным покрытием (ΔT , К).

Построение зависимости ширины рефлексов на полувысоте (FWHM) присутствующих фаз покрытия от температуры воздействия производилось для оценки температуры, при которой возможно возникновение микронапряжений. Из литературы [21] известно, что величина микронапряжений прямо пропорциональна FWHM. Поэтому, сравнивая между собой FWHM минимум двух образцов с многослойными покрытиями, можно сделать вывод о степени имеющихся микронапряжений в многослойных покрытиях.

Результаты и их обсуждение

Нагрев происходил в воздушной атмосфере на держателе с нагревательным платиновым элементом. Исходное состояние материала многослойного покрытия охарактеризовалось получением рентгенограммы при температуре, равной 30 °C. В нашем случае для фаз покрытия CrN и ZrN диапазон регистрации рентгенограммы 2Θ – от 31 до 48 градусов.

На рис. 2 представлен массив рентгенограмм при экспозиции 0,5 мин, полученных при нагреве образцов с покрытиями ZrN/CrN от 30 до 750 °C со скоростью нагрева 5 °C/мин методом асимметричной съемки с использованием синхротронного излучения, преобразованного до монохроматического излучения с длиной волны 1,54 Å. Массив содержит 71 проекцию рентгенограмм, полученных как с поверхностно-

го слоя подложки, так и со слоев нанесенного многослойного покрытия, где каждая проекция рентгенограммы представляет собой градиацию псевдоцвета, показанную на рис. 2 и обозначающую интенсивность полученного сигнала при построении рентгенограммы. Подобная форма визуализации данных удобна для качественного анализа фазовых превращений.

По графикам, представленным на рис. 2, можно также оценить конечную стадию фазовых переходов в многослойных покрытиях. В случае покрытия CrN/ZrN, нанесенного при скорости вращения стола 0,5 об/мин, фаза покрытия полностью исчезает при 575 °С, в то время как в случае многослойного покрытия CrN/ZrN, нанесенного при скорости вращения стола 8 об/мин, фаза покрытия полностью исчезает только при достижении 635 °С.

На рис. 3 представлены отобранные рентгенограммы из массива, показанного на рис. 2. Интервал, а также начальные и конечные точки температурного воздействия взяты из соображений удобочитаемости меньшего массива данных и соображений окончания фазовых превращений. Как видно на рис. 2, фазы покрытия в многослойных покрытиях полностью исчезают после 650 °С, поэтому целесообразно ограничиваться диапазоном температур от 30 до 650 °С.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения межплоскостных расстояний (d , Å), значения

ширины рефлекса на его полувысоте FWHM (град.), а также вычисленный по формуле (1) [20] параметр кристаллической решетки для компонент многослойного покрытия CrN/ZrN, полученного при скорости вращения подложкодержателя 0,5 об/мин.

Выполнение расчетов ЛКТР производилось по формуле (2) для каждой точки температурного воздействия, представленной в табл. 1. На рентгенограмме (рис. 3) присутствуют рефлексы (111) фазы CrN и (111) фазы ZrN многослойного покрытия в выбранном температурном диапазоне.

Зависимость параметра кристаллической решетки от температуры воздействия показана на рис. 4, а. Из графика следует, что параметр кристаллической решетки материалов покрытия (CrN и ZrN) увеличивается, т. е. материал увеличивается в объеме, причем это происходит по линейному закону с некоторой погрешностью. Зависимость изменения параметра кристаллической решетки от температуры воздействия материалов покрытия (CrN и ZrN) показана на рис. 4, б.

Формула (2) применяется следующим образом. Очевидно, что на рис. 4, б изображен перестроенный график, показанный на рис. 4, а, таким образом, что $\Delta a = a_T - a_0$, где a_T – параметр кристаллической решетки при более высокой температуре (на рис. 4 наибольшие значения на

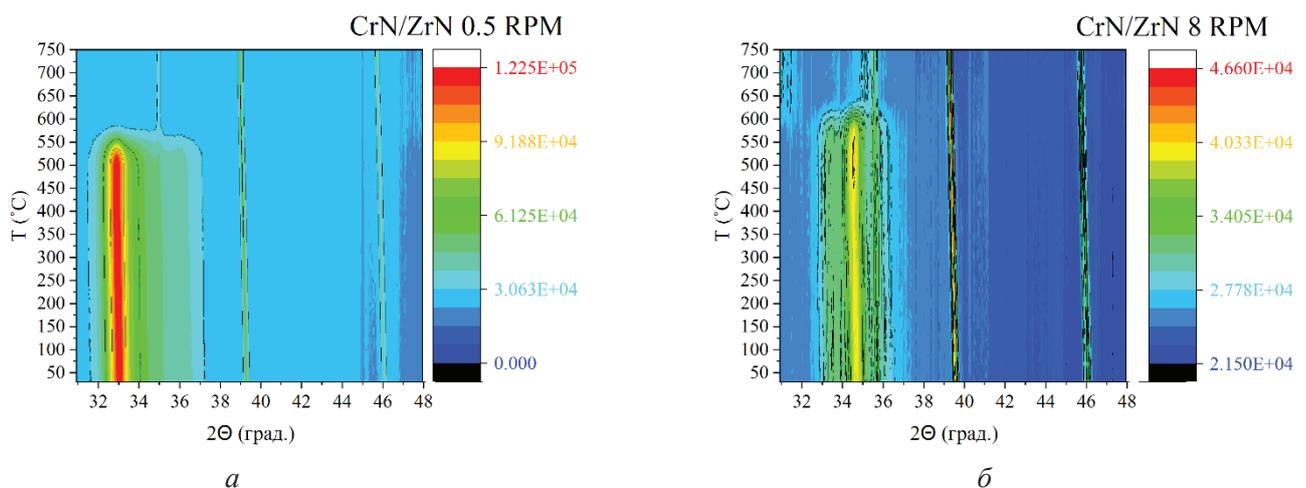


Рис. 2. Проекция рентгенограмм в градиации псевдоцвета, обозначающие интенсивность сигнала при получении рентгенограммы:

a – ZrN/CrN 0,5 об/мин; b – ZrN/CrN 8 об/мин

Fig. 2. Projections of X-ray diffraction patterns, in pseudocolor gradation, denoting the signal intensity when taking X-ray diffraction patterns:

a – ZrN/CrN 0.5 rpm; b – ZrN/CrN 8 rpm

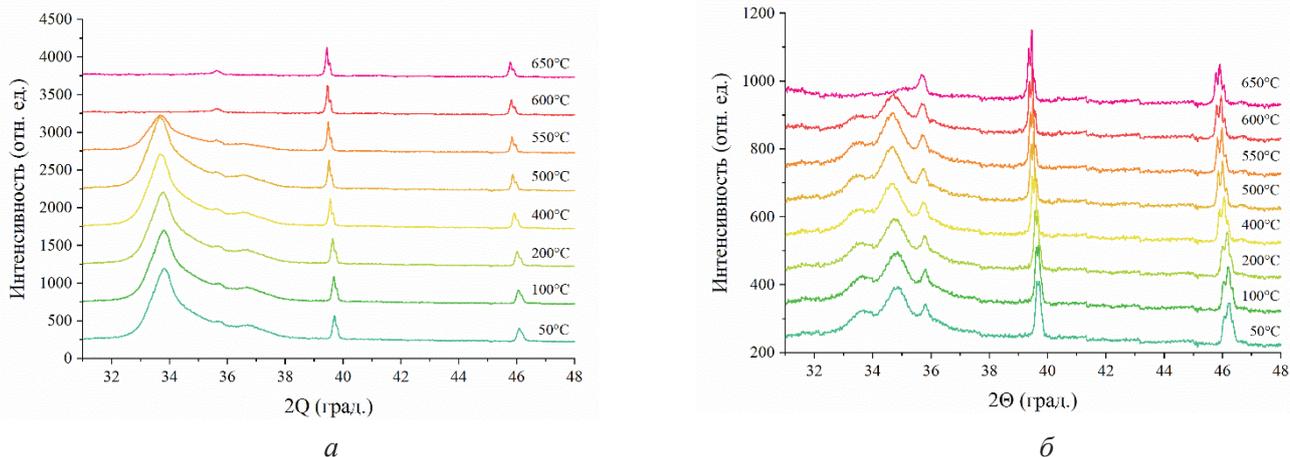


Рис. 3. Ряд рентгенограмм экспериментального образца со сформированными на поверхности многослойными покрытиями ZrN/CrN, произведенных при нагреве образца с многослойными покрытиями от 30 до 750 °С методом асимметричной съемки с использованием синхротронного излучения:

a – ZrN/CrN 0,5 об/мин; *б* – ZrN/CrN 8 об/мин

Fig. 3. A series of X-ray diffraction patterns of an experimental sample with a multilayer ZrN/CrN coating, obtained by asymmetric imaging using synchrotron radiation when heating from 30°C to 750°C:

a – ZrN/CrN 0.5 rpm; *б* – ZrN/CrN 8 rpm

Таблица 1

Table 1

Характеристики рефлексов фаз в образце с многослойным покрытием CrN/ZrN, полученным при скорости вращения подложкодержателя 0,5 об/мин в зависимости от температуры воздействия

Characteristics of phase reflections in the sample with multilayer coating of CrN/ZrN obtained at a substrate holder rotation speed of 0.5 rpm depending on the heating temperature

Температура воздействия, °С	Рефлекс, фазы	<i>d</i> , Å	FWHM, град	<i>a</i> , нм
50	(111) ZrN	2,654	1,0131	4,5965
	(111) CrN	2,45	1,5584	4,2426
100	(111) ZrN	2,653	1,0433	4,5956
	(111) CrN	2,44	1,3269	4,2265
200	(111) ZrN	2,658	0,9849	4,6030
	(111) CrN	2,45	1,4758	4,2428
400	(111) ZrN	2,662	0,9586	4,6105
	(111) CrN	2,456	1,5005	4,2540
500	(111) ZrN	2,664	0,915	4,6145
	(111) CrN	2,454	1,4635	4,2511
550	(111) ZrN	2,662	0,8375	4,6103
	(111) CrN	2,455	1,5585	4,2516

линейных участках 50–550 °С); *a*₀ – параметр кристаллической решетки при температуре начала линейных участков (на рис. 4 наименьшие значения на линейных участках 50–550 °С). Следовательно, для участка нагрева от 50 до 550 °С ЛКТР (β) фазы ZrN многослойного покрытия будет рассчитан как

$$\beta_{ZrN} = \frac{4,6145 - 4,5965}{4,5965(550 - 50)} = 7,83 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}.$$

Для линейного участка нагрева от 50 до 550 °С ЛКТР (β) фазы CrN многослойного покрытия будет равен

$$\beta_{CrN} = \frac{4,2516 - 4,2426}{4,2426(550 - 50)} = 4,24 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}.$$

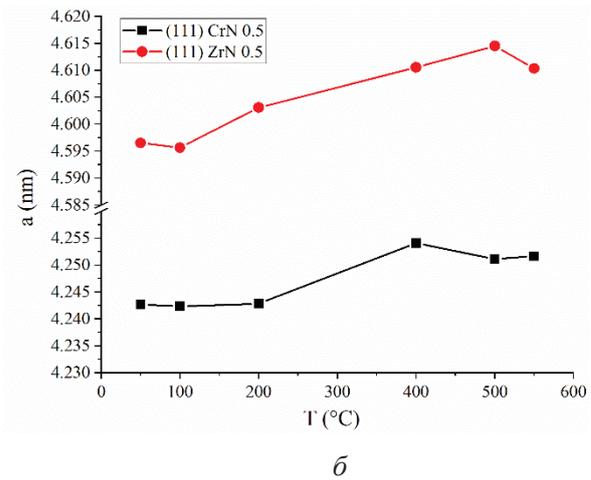
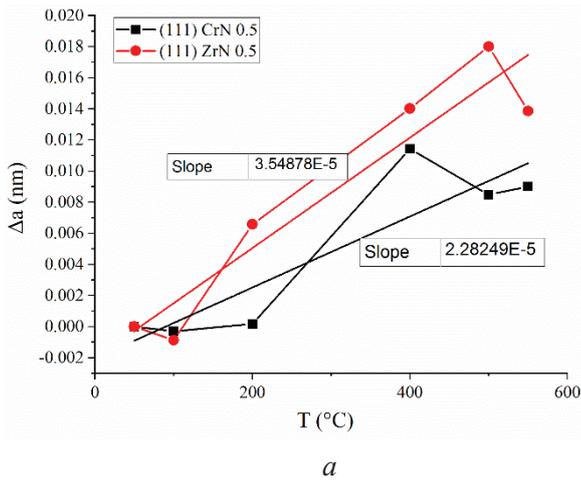


Рис. 4. Зависимость величины параметра кристаллической решетки фаз многослойного покрытия ZrN/CrN от температуры воздействия (а); зависимость изменения параметра кристаллической решетки (Δa) фаз многослойного покрытия ZrN/CrN от температуры воздействия (б)

Fig. 4. Dependence of the crystal lattice parameter of the ZrN/CrN multilayer coating phases on temperature (a); dependence of the changes in the crystal lattice parameter (Δa) of the phases of the ZrN/CrN multilayer coating on temperature (b)

Формулу (2) можно представить графически – в виде зависимости изменения параметра кристаллической решетки Δa от температуры воздействия, как показано на рис. 4, б. Тангенс угла наклона в этом случае – это скорость изменения величины параметра решетки (нм) при нагреве на 1 °С.

ЛКТР на всем диапазоне температурного воздействия от 50 до 650 °С был положительным для обеих фаз многослойного покрытия: для фазы CrN он составил $2,28249 \cdot 10^{-14} \text{ K}^{-1}$, для фазы ZrN – $3,54878 \cdot 10^{-14} \text{ K}^{-1}$.

На рис. 5 показан график зависимости FWHM рефлексов (111) фазы CrN и (111) фазы ZrN от температуры воздействия. Ориентируясь на возможность возникновения микронапряжений при повышении величины FWHM, можно сделать вывод, что повышение микронапряжений возможно в интервале температур от 50 до 400 °С для фазы CrN. После достижения температуры 400 °С величина FWHM возрастает, и соответственно микронапряжения также будут иметь повышающую зависимость для фазы CrN. Для фазы ZrN ситуация обратная: практически на всем протяжении процесса нагрева величина FWHM убывает, соответственно и микронапряжения будут только понижаться.

В табл. 2 приведены вычисленные значения межплоскостных расстояний (d , Å), значения ширины рефлекса на его полувысоте (FWHM)

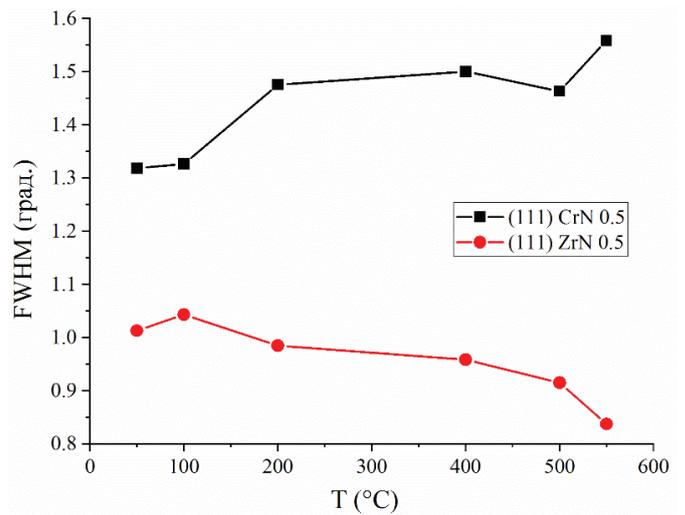


Рис. 5. Зависимость FWHM рефлексов (111) CrN и (111) ZrN многослойного покрытия от температуры воздействия

Fig. 5. Dependence of FWHM reflection of (111) CrN and (111) ZrN multilayer coating on temperature

(град), а также рассчитанный по формуле (1) [20] параметр кристаллической решетки для многослойного покрытия CrN/ZrN, полученного при скорости вращения подложкодержателя 8 об/мин.

Осуществление расчетов ЛКТР производилось по формуле (2) для каждой точки температурного воздействия, представленной в табл. 1. На рентгенограмме присутствуют рефлексы (111)

Характеристики рефлексов всех присутствующих фаз в образце с многослойным покрытием CrN/ZrN, полученном при скорости вращения подложкодержателя 8 об/мин в зависимости от температуры воздействия

Characteristics of reflections of all phases, presented in a sample with a multilayer CrN/ZrN coating, obtained at a substrate holder rotation speed of 8 rpm as a function of temperature

Температура воздействия, °C	Рефлекс фазы	d , Å	FWHM, град	a , нм
50	(111) ZrN	2,6596	1,1329	4,6065
	(111) CrN	2,4595	1,5925	4,2599
100	(111) ZrN	2,6644	1,0414	4,6148
	(111) CrN	2,4679	1,5137	4,2745
200	(111) ZrN	2,6671	1,0504	4,6195
	(111) CrN	2,4633	1,6553	4,2665
400	(111) ZrN	2,6721	1,0941	4,6282
	(111) CrN	2,4519	1,6526	4,2468
500	(111) ZrN	2,6732	1,0407	4,6301
	(111) CrN	2,4595	1,6878	4,2599
550	(111) ZrN	2,6729	0,9904	4,6295
	(111) CrN	2,4572	1,6518	4,25599524
600	(111) ZrN	2,6698	0,8949	4,62422925
	(111) CrN	2,4739	1,652	4,28492049

фазы CrN и (111) фазы ZrN многослойного покрытия в выбранном температурном диапазоне.

Зависимость параметра кристаллической решетки от температуры воздействия показана на рис. 6, а. Из графика следует, что параметр кристаллической решетки материалов покрытия (CrN и ZrN) увеличивается, т. е. материал увеличивает свой объем, причем это происходит по линейному закону с некоторой погрешностью.

Зависимость изменения параметра кристаллической решетки от температуры воздействия материалов покрытия (CrN и ZrN) показана на рис. 6, б.

Формула (2) применяется следующим образом. Очевидно, что рис. 6, б – это перестроенный график, показанный на рис. 6, а, таким образом, что $\Delta a = a_T - a_0$, где a_T – параметр кристаллической решетки при более высокой температуре

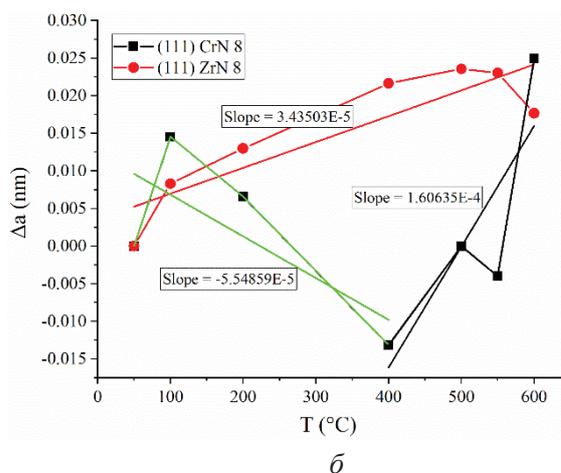
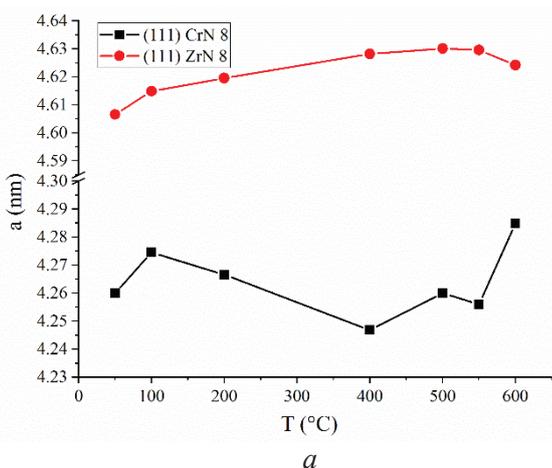


Рис. 6. Зависимость изменения параметра кристаллической решетки фаз многослойного покрытия ZrN/CrN от температуры воздействия (а); зависимость изменения параметра кристаллической решетки (Δa) фаз многослойного покрытия ZrN/CrN от температуры воздействия (б)

Fig. 6. Dependence of the changes in the crystal lattice parameter of the phases of the ZrN/CrN multilayer coating on temperature (a); dependence of the changes in the crystal lattice parameter (Δa) of the phases of the ZrN/CrN multilayer coating on temperature (b)

(на рис. 6 наибольшие значения на линейных участках 50–550 °С), a_0 – параметр кристаллической решетки при температуре начала линейных участков (на рис. 6 наименьшие значения на линейных участках 50–550 °С). Следовательно, для участка нагрева от 50 до 550 °С КЛТР (β) фазы ZrN многослойного покрытия рассчитан как

$$\beta_{ZrN} = \frac{4,6242 - 4,6065}{4,6065(600 - 50)} = 6,99 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}.$$

В случае компоненты покрытия CrN на рис. 3, а видно, что зависимость не линейная, а состоит из двух линейных участков.

Первый участок: 50–400 °С, для него следует считать ЛКТР отдельно. Для этого линейного участка нагрева от 50 до 400 °С ЛКТР (β) фазы CrN многослойного покрытия равен

$$\beta_{CrN} = \frac{4,2468 - 4,2599}{4,2599(400 - 50)} = -8,79 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}.$$

Таким образом, в температурном диапазоне нагрева от 50 до 400 °С происходит сжатие компоненты многослойного покрытия CrN.

Второй участок: 400–600 °С, для него также следует считать ЛКТР отдельно. Для этого линейного участка нагрева от 400 до 600 °С ЛКТР (β) фазы CrN многослойного покрытия рассчитан как

$$\beta_{CrN} = \frac{4,2849 - 4,2468}{4,2468(600 - 400)} = 4,49 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

Таким образом, в температурном диапазоне нагрева от 400 до 600 °С происходит расширение компоненты многослойного покрытия CrN, но ЛКТР компоненты CrN на порядок выше, чем компоненты многослойного покрытия ZrN.

Для наглядности формулу (2) можно представить графически в виде зависимости изменения параметра кристаллической решетки (Δa) от температуры воздействия, как показано на рис. 6, б. Тангенс угла наклона в этом случае – это скорость изменения величины параметра решетки (нм) при нагреве на 1 °С.

ЛКТР в диапазоне температурного воздействия от 50 до 600 °С будет положительным, для фазы ZrN он составляет $3,44 \cdot 10^{-5}$ нм/К, как показано над красной прямой линией. Для фазы CrN многослойного покрытия на участке температурного воздействия от 50 до 400 °С КЛТР соответствует отрицательному значению

$-5,55 \cdot 10^{-5}$ нм/К. Положительный участок значения ЛКТР находится в температурном диапазоне от 400 до 600 °С и составляет $1,61 \cdot 10^{-4}$ нм/К для фазы CrN многослойного покрытия.

На рис. 7 показан график зависимости FWHM рефлексов (111) фазы CrN и (111) фазы ZrN от температуры воздействия. Ориентируясь на возможность возникновения микронапряжений при повышении величины FWHM, можно сделать вывод, что повышение микронапряжений возможно в небольшой степени для фазы многослойного покрытия CrN до 200 °С; после достижения температуры 200 °С величина FWHM остается в среднем на одном уровне. Для компоненты покрытия ZrN величина FWHM возрастает в небольшой степени до температуры 400 °С, а затем следует понижение FWHM, соответственно микронапряжения также будут иметь понижающую зависимость.

В результате последовательно проведенных действий с получением рентгенограмм образцов с покрытиями при термическом воздействии на них, последующей выборки и оценки рентгенограмм по предлагаемому алгоритму можно дать рекомендации по применению технологий получения покрытий в зависимости от параметров нанесения покрытий.

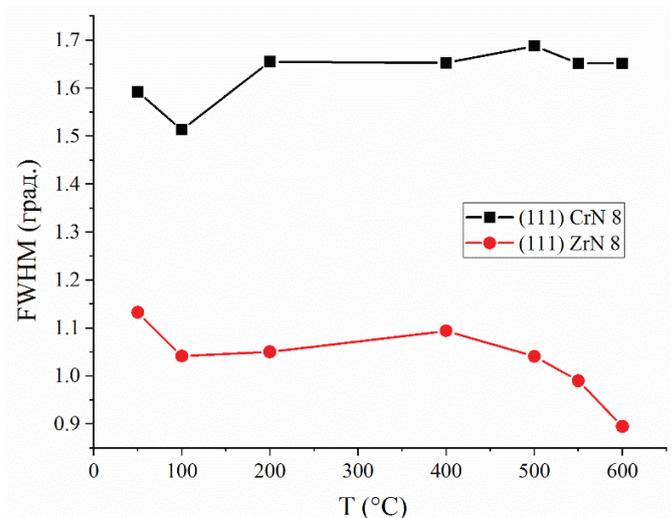


Рис. 7. Зависимость FWHM рефлексов (111) CrN и (111) ZrN многослойного покрытия от температуры воздействия

Fig. 7. Dependence of FWHM reflection of (111) CrN and (111) ZrN multilayer coating on temperature

Рекомендуется двухступенчатый алгоритм, состоящий из следующих этапов:

- определения ЛКТР отдельных компонент покрытия;
- определения FWHM и сравнение с FWHM минимум двух образцов с покрытиями.

При этом если рассчитанные значения ЛКТР для отдельных компонент покрытия будут иметь отличия, то режим нанесения многослойного покрытия, в котором различия ЛКТР компонент покрытия при какой-то температуре будут минимальным, выбирается как наилучший режим нанесения покрытия. Температура, при которой ЛКТР компонент покрытия будут иметь минимальные отличия или будут равны, выбирается как оптимальная для этого режима нанесения многослойного покрытия. Покрытие, в котором определены при помощи аппроксимации профиля рентгенограммы значения FWHM будут иметь понижающую зависимость, в наибольшей степени пригодны для длительного использования ввиду наименьших микронапряжений, существующих в покрытии.

Выводы

В соответствии с проведенными по предложенному алгоритму исследованиями можно сделать выводы и рекомендации по нанесению и использованию покрытий из CrN/ZrN.

Многослойное покрытие CrN/ZrN, нанесенное при скорости вращения стола 0,5 об/мин, имеет отличающиеся значения ЛКТР на всем протяжении термических испытаний; разница ЛКТР компонент в этом случае составила более 50 %. При термических испытаниях многослойного покрытия, нанесенного при скорости вращения стола 8 об/мин, зависимость ЛКТР оказалась линейной только для компоненты CrN, а для компоненты ZrN эта зависимость имеет экстремум в области температурного воздействия 400 °С. При этом до температуры 400 °С ЛКТР отрицательный, а после достижения 400 °С меняет знак на положительный. Это означает, что в узкой области температур около 400 °С ЛКТР обеих компонент покрытия не будет иметь отличий, поэтому режим нанесения покрытия, при котором скорость вращения стола равна 8 об/мин, будет оптимальным.

Возникновение микронапряжений, на основании данных о FWHM, возможно при обоих

режимах нанесения покрытий (0,5 и 8 об/мин), но в случае режима нанесения покрытия, при котором скорость вращения стола равна 8 об/мин, не наблюдается возникновения микронапряжений компоненты CrN даже после 500 °С. Это позволяет сделать вывод о том, что такой режим нанесения многослойного покрытия будет оптимальным.

Список литературы

1. Oxidation behavior, thermal stability, and the coating/substrate interface evolution of CrN-coated Zircaloy under high-temperature steam / J. Liu, Z. Hao, Z. Cui, D. Ma, J. Lu, Y. Cui, C. Li, W. Liu, S. Xie, P. Hu, P. Huang, G. Bai, D. Yun // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 185. – P. 109416. – DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109416.
2. Reverse engineering of mechanical and tribological properties of coatings: results of machine learning algorithms / D.M. Pashkov, O.A. Belyak, A.A. Guda, V.I. Kolesnikov // *Physical Mesomechanics*. – 2022. – Vol. 25. – P. 296–305. – DOI: 10.1134/S1029959922040038.
3. A comparative study of CrN, ZrN, NbN and TaN layers as cobalt diffusion barriers for CVD diamond deposition on WC–Co tools / J.P. Manaud, A. Poulon, S. Gomez, Y.L. Petitcorps // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 202. – P. 222–231. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.05.024.
4. Lee D.B., Lee Y.C., Kwon S.C. High temperature oxidation of TiCrN coatings deposited on a steel substrate by ion plating // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 141. – P. 232–239. – DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01237-3.
5. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy / A.V. Kolubaev, O.V. Sizova, Y.A. Denisova, A.A. Leonov, N.V. Teryukalova, O.S. Novitskaya, A.V. Byeli // *Physical Mesomechanics*. – 2022. – Vol. 25. – P. 306–317. – DOI: 10.1134/S102995992204004X.
6. Transient experiments on oxidation and degradation of Cr-coated Zircaloy in steam up to 1600 °C / J. Liu, C. Tang, M. Steinbrück, J. Yang, U. Stegmaier, M. Große, D. Yun, H.J. Seifert // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 192. – P. 109805. – DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109805.
7. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating thickness and microstructure / E.B. Kashkarov, D.V. Sidelev, M.S. Syrtanov, C. Tang, M. Steinbrück // *Corrosion Science*. – 2020. – Vol. 175. – P. 108883. – DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108883.
8. Discussion on structural parameters of the multilayer ZrC/TaC coatings based on stress analysis and abla-

- tion behaviors / D. Hu, Q. Fu, X. Li, L. Zhou, J. Zhang // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 435. – P. 128243. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128243.
9. *Chen Y.I., Lo H.H., Ke Y.E.* Thermal stability of laminated Ru–Al/Ru–Si–Zr coatings on Inconel 617 // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 399. – P. 126194. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126194.
10. Protection of Zr alloy under high-temperature air oxidation: a multilayer coating approach / D.V. Sidelev, M.S. Syrtanov, S.E. Ruchkin, A.V. Pirozhkov, E.B. Kashkarov // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11. – P. 227. – DOI: 10.3390/coatings11020227.
11. *Boretius M., Krappitz H., Rass I.* Wear protection coatings generated by brazing, sintering and heat treatment in vacuum // *Tribologie und Schmierungstechnik*. – 2017. – Vol. 64. – P. 35–9.
12. *Gérard B.* Application of thermal spraying in the automobile industry // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – P. 2028–2031. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.04.050.
13. High-rate deposition of thick (Cr,Al)ON coatings by high speed physical vapor deposition / K. Bobzin, T. Brögelmann, C. Kalscheuer, T. Liang // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 322. – P. 152–162. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.034.
14. Structural aspects of wear resistance of coatings deposited by physical vapor deposition / V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, I.Y. Zabayaka, E.S. Novikov, D.S. Manturov // *Physical Mesomechanics*. – 2020. – Vol. 23. – P. 570–583. – DOI: 10.1134/S1029959920060132.
15. Microstructures of Ni–AlN composite coatings prepared by pulse electrodeposition technology / F. Xia, H. Xu, C. Liu, J. Wang, J. Ding, C. Ma // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 271. – P. 7–11. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.12.064.
16. Composition, structure and properties of Mo–N coatings formed by the method of vacuum-arc plasma-assisted deposition / O.V. Krysinina, Y.F. Ivanov, N.N. Koval, N.A. Prokopenko, V.V. Shugurov, E.A. Petrikova, O.S. Tolkachev // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 416. – P. 127153. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127153.
17. Microstructure, high-temperature corrosion and steam oxidation properties of Cr/CrN multilayer coatings prepared by magnetron sputtering / Z. Li, C. Liu, Q. Chen, J. Yang, J. Liu, H. Yang, W. Zhang, R. Zhang, L. He, J. Long, H. Chang // *Corrosion Science*. – 2021. – Vol. 191. – P. 109755. – DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109755.
18. *Khamseh S., Araghi H.* A study of the oxidation behavior of CrN and CrZrN ceramic thin films prepared in a magnetron sputtering system // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42. – P. 9988–9994. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.03.101.
19. PseudoVoigt, (n.d.). – URL: <https://docs.mantid-project.org/nightly/fitting/fitfunctions/PseudoVoigt.html> (accessed: 11.04.2023).
20. *Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.* Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.
21. *Русаков А.* Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.

Конфликт интересов

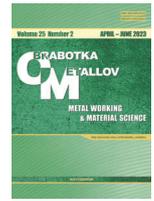
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



In-situ analysis of ZrN/CrN multilayer coatings under heating

Andrey Vorontsov^{1, a}, Andrey Filippov^{1, b, *}, Nikolay Shamarin^{1, c}, Evgenij Moskvichev^{1, d}, Ol'ga Novitskaya^{1, e}, Evgenii Knyazhev^{1, f}, Yuliya Denisova^{2, g}, Andrei Leonov^{2, h}, Vladimir Denisov^{2, i}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

² Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 per. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>,  vav@ispms.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>,  andrey.v.filippov@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>,  shnn@ispms.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>,  em_tsu@mail.ru,
^e  <https://orcid.org/0000-0003-1043-4489>,  nos@ispms.tsc.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>,  zhenya4825@gmail.com,
^g  <https://orcid.org/0000-0002-3069-1434>,  yukolubaeva@mail.ru, ^h  <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>,  laa-91@yandex.ru,
ⁱ  <https://orcid.org/0000-0002-5446-2337>,  volodyadenisov@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 March 2023

Revised: 22 March 2023

Accepted: 28 March 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Coating

Nitrides

Phase composition

RSA

CTE

Stresses

Funding

The work was carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education (project No. 075-15-2021-1348) within the framework of event No. 1.1.16.

Acknowledgements

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

For citation: Vorontsov A.V., Filippov A.V., Shamarin N.N., Moskvichev E.N., Novitskaya O.S., Knyazhev E.O., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Denisov V.V. In-situ analysis of ZrN/CrN multilayer coatings under heating. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 68–80. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-68-80. (In Russian).

ABSTRACT

Introduction. Advanced hard coatings combine different properties such as high hardness, wear resistance, corrosive resistance. At present, layer-by-layer deposited zirconium and chromium nitrides are promising hard coating materials. Currently, the multilayer coating process is not sufficiently described in the literature to understand all the processes involved. The problem is the complexity of depositing thick layers of multilayer, multicomponent coatings with different physical characteristics of the coating components. First and foremost this concerns the *coefficient of linear thermal expansion (CTE)*. Since the coating and operating processes consist in heating, coating components with different CTE will be susceptible to cracking, further failure and product failure over time. **The purpose** of work is in-situ study of multilayer ZrN/CrN coatings by X-ray analysis using synchrotron radiation and qualitative microstress behavior of multilayer coatings formed by plasma-assisted vacuum-arc method on substrate of alloy VK8 (92% WC–8% Co) under heating up to 750°C. **Research methodology.** Samples of coatings made of chromium and zirconium nitrides deposited on a substrate of the hard alloy VK8 are investigated. The basic method is the X-ray analysis using synchrotron radiation. We used the most common techniques to study the characteristics of multilayered coatings such as the *coefficient of linear thermal expansion* and the *qualitative measurement of microstresses*. **Results and discussion.** The result is the ability to determine changes in the characteristics of multilayer coatings during heating, such as changes in the crystal lattice parameter of each of the coating components separately, the possibility to determine the *coefficient of linear thermal expansion* of the coating components and the *qualitative measurement of microstresses*, as well as providing the opportunity, based on the analysis, to form recommendations for further application of the technology of applying multilayer coatings with given characteristics.

References

1. Liu J., Hao Z., Cui Z., Ma D., Lu J., Cui Y., Li C., Liu W., Xie S., Hu P., Huang P., Bai G., Yun D. Oxidation behavior, thermal stability, and the coating/substrate interface evolution of CrN-coated Zircaloy under high-temperature steam. *Corrosion Science*, 2021, vol. 185, p. 109416. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109416.

* Corresponding author

Vorontsov Andrey V., Ph.D. (Engineering), Junior researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
 2/4 pr. Akademicheskii,
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (983) 239-34-17, e-mail: vav@ispms.ru

2. Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Kolesnikov V.I. Reverse engineering of mechanical and tribological properties of coatings: results of machine learning algorithms. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25, pp. 296–305. DOI: 10.1134/S1029959922040038.
3. Manaud J.P., Poulon A., Gomez S., Petitcorps Y.L. A comparative study of CrN, ZrN, NbN and TaN layers as cobalt diffusion barriers for CVD diamond deposition on WC–Co tools. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 202, pp. 222–231. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.05.024.
4. Lee D.B., Lee Y.C., Kwon S.C. High temperature oxidation of TiCrN coatings deposited on a steel substrate by ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 141, pp. 232–239. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01237-3.
5. Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Y.A., Leonov A.A., Teryukalova N.V., Novitskaya O.S., Byeli A.V. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25, pp. 306–317. DOI: 10.1134/S102995992204004X.
6. Liu J., Tang C., Steinbrück M., Yang J., Stegmaier U., Große M., Yun D., Seifert H.J. Transient experiments on oxidation and degradation of Cr-coated Zircaloy in steam up to 1600 C. *Corrosion Science*, 2021, vol. 192, p. 109805. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109805.
7. Kashkarov E.B., Sidelev D.V., Syrtanov M.S., Tang C., Steinbrück M. Oxidation kinetics of Cr-coated zirconium alloy: Effect of coating thickness and microstructure. *Corrosion Science*, 2020, vol. 175, p. 108883. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108883.
8. Hu D., Fu Q., Li X., Zhou L., Zhang J. Discussion on structural parameters of the multilayer ZrC/TaC coatings based on stress analysis and ablation behaviors. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 435, p. 128243. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128243.
9. Chen Y.I., Lo H.H., Ke Y.E. Thermal stability of laminated Ru–Al/Ru–Si–Zr coatings on Inconel 617. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 399, p. 126194. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126194.
10. Sidelev D.V., Syrtanov M.S., Ruchkin S.E., Pirozhkov A.V., Kashkarov E.B. Protection of Zr alloy under high-temperature air oxidation: a multilayer coating approach. *Coatings*, 2021, vol. 11, p. 227. DOI: 10.3390/coatings11020227.
11. Boretius M., Krappitz H., Rass I. Wear protection coatings generated by brazing, sintering and heat treatment in vacuum. *Tribologie und Schmierungstechnik*, 2017, vol. 64, pp. 35–9.
12. Gérard B. Application of thermal spraying in the automobile industry. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, pp. 2028–2031. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.04.050.
13. Bobzin K., Brögelmann T., Kalscheuer C., Liang T. High-rate deposition of thick (Cr,Al)ON coatings by high speed physical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 322, pp. 152–162. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2017.05.034.
14. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabayaka I.Y., Novikov E.S., Manturov D.S. Structural aspects of wear resistance of coatings deposited by physical vapor deposition. *Physical Mesomechanics*, 2020, vol. 23, pp. 570–583. DOI: 10.1134/S1029959920060132.
15. Xia F., Xu H., Liu C., Wang J., Ding J., Ma C. Microstructures of Ni–AlN composite coatings prepared by pulse electrodeposition technology. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 271, pp. 7–11. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.12.064.
16. Krysina O.V., Ivanov Y.F., Koval N.N., Prokopenko N.A., Shugurov V.V., Petrikova E.A., Tolkachev O.S. Composition, structure and properties of Mo–N coatings formed by the method of vacuum-arc plasma-assisted deposition. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 416, p. 127153. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127153.
17. Li Z., Liu C., Chen Q., Yang J., Liu J., Yang H., Zhang W., Zhang R., He L., Long J., Chang H. Microstructure, high-temperature corrosion and steam oxidation properties of Cr/CrN multilayer coatings prepared by magnetron sputtering. *Corrosion Science*, 2021, vol. 191, p. 109755. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109755.
18. Khamseh S., Araghi H. A study of the oxidation behavior of CrN and CrZrN ceramic thin films prepared in a magnetron sputtering system. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, p. 9988–9994. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.03.101.
19. PseudoVoigt, (n.d.). Available at: <https://docs.mantidproject.org/nightly/fitting/fitfunctions/PseudoVoigt.html> (accessed 11.04.2023).
20. Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. *Rentgenograficheskii i elektronnoopticheskii analiz* [X-Ray diffraction and electron-optical analysis]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 366 p.
21. Rusakov A. *Rentgenografiya metallov* [Metal radiography]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 480 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Структура и свойства покрытий WC-10Co4Cr, полученных высокоскоростным плазменным напылением

Елена Корниенко^{1, a, *}, Игорь Гуляев^{2, b}, Виктор Кузьмин^{2, c}, Александр Тамбовцев^{2, d}, Павел Тырышкин^{2, e}

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

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  e.kornienko@corp.nstu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-5186-6793>,  gulyaev@itam.nsc.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  vikuzmin57@mail.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0003-1635-9352>,  alsetam123@icloud.com,

^e  <https://orcid.org/0009-0009-8125-6772>,  pavel199730@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 24 марта 2023

Рецензирование: 02 апреля 2023

Принята к печати: 08 апреля 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Плазменное напыление
 Высокоскоростное плазменное напыление
 Покрытие
 WC-Co
 HV-APS
 Coating

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № 121030500145-0).

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Углеродистая сталь часто используется для изготовления различных деталей машин, но эксплуатация в агрессивных условиях способствует быстрому снижению их свойств вплоть до выхода из строя. Решением данной проблемы является модификация рабочих поверхностей стальных деталей для повышения их износостойкости и коррозионной стойкости, что будет способствовать увеличению срока их службы. Стальные детали с металлокерамическими покрытиями на основе карбида вольфрама WC часто применяются там, где требуются повышенная твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. **Цель работы.** Исследовать влияние режимов высокоскоростного плазменного напыления (high velocity plasma spraying, HV-APS) с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа на структуру, фазовый состав и свойства покрытий WC-Co. **Материалы и методики.** В настоящей работе покрытия WC-10Co4Cr наносили на подложку из стали 20 методом HV-APS. Структуру и фазовый состав покрытий анализировали при помощи оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также рентгенофазового анализа (РФА). Кроме того, в работе представлены результаты измерений пористости, микротвердости, износостойкости и качественная оценка адгезии полученных покрытий. **Результаты и обсуждение.** Показано, что все покрытия характеризуются высокой плотностью, отсутствием трещин и оксидных пленок. Установлено, что покрытия состоят из частиц WC и W₂C, равномерно распределенных в металлической матрице, которая представляет собой аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор Co(W,C). Максимальное количество карбидов (49 %) наблюдается в покрытиях, полученных при дистанции напыления 170 мм, ток дуги – 140 А. Минимальное количество карбидов (25 %) наблюдается в покрытиях, полученных при дистанции напыления 250 мм, ток дуги – 200 А. Покрытия с максимальным количеством карбидов обладают максимальными значениями микротвердости (1284 HV_{0,1}) и износостойкости. Установлено, что все покрытия характеризуются высокой адгезией. При испытаниях на загиб 180° вокруг направляющего ролика они не отслаивались.

Для цитирования: Структура и свойства покрытий WC-10Co4Cr, полученных высокоскоростным плазменным напылением / Е.Е. Корниенко, И.П. Гуляев, В.И. Кузьмин, А.С. Тамбовцев, П.А. Тырышкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 81–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-81-92.

Введение

Сталь широко применяется для изготовления различных деталей машин благодаря комплексу высоких механических, технологических и физико-химических свойств. Несмотря на эти преимущества, эксплуатация стальных деталей в агрессивных условиях (высокие температуры,

*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: e.kornienko@corp.nstu.ru

износ и коррозионные среды) способствует быстрому снижению их свойств вплоть до выхода из строя. Решением данной проблемы является модификация рабочих поверхностей стальных деталей для повышения их износостойкости и коррозионной стойкости, что будет способствовать увеличению срока их службы [1, 2]. Кроме того, нанесение небольших по толщине покрытий позволит сохранить допустимый уровень вязкости по сечению изделий.

Известно, что стальные детали с металло-керамическими покрытиями на основе карбида вольфрама (WC) часто используются в таких областях промышленности, как нефтедобывающая, авиационная, металлургическая, химическая и машиностроительная, благодаря высокой твердости, износостойкости и коррозионной стойкости [3–6]. К основным технологиям нанесения покрытий из этих материалов относятся HVOF и APS [7–11]. Из-за высокой твердости и хрупкости частицы WC обычно наносят вместе с металлическим связующим, формируя композиционные покрытия. Такие покрытия сочетают в себе высокую пластичность, ударную вязкость и технологичность связующего (Co, Ni, Ti, Fe, Cu и других), а также высокую износостойкость и коррозионную стойкость керамики [12, 13].

Известно, что, изменяя параметры напыления или характеристики напыляемого порошка, можно контролировать структуру и фазовый состав, а значит, и свойства покрытий. Так, в работе [14] установлена зависимость пористости и коррозионной стойкости покрытий WC-12Co, полученных методом HVOF, от температуры нагрева частиц в струе транспортирующего газа. Более высокая температура нагрева способствовала формированию аморфной структуры в покрытиях и повышению коррозионной стойкости. Авторы работы [15] показали, что параметры процесса HVOF при напылении покрытий WC-12Co влияют на фазовый состав, пористость, твердость и позволяют управлять трибологическими характеристиками покрытий. В работах [16–18] утверждается, что использование наноструктурированного порошка WC-Co позволяет значительно повысить твердость, износостойкость и коррозионную стойкость по сравнению с покрытиями, полученными из микронных порошков WC-Co. Использование авторами работы [7] беспористого ультрамелкозернистого по-

рошка WC-Co позволило получить покрытия, состоящие только из WC и аморфной и нанокристаллической матрицы Co, износостойкость которых была в четыре раза выше, чем у покрытий из более крупного порошка. С другой стороны, в работах [19, 20] показано, что при нанесении газотермическими методами большая часть наноразмерного порошка WC успевает разложиться в напылительной струе. Это, в свою очередь, приводит к снижению износостойкости формируемых покрытий. Авторы работы [5] показали, что при плазменном напылении большее влияние на износостойкость оказывает состав плазмообразующего газа Ar/He или Ar/H₂, а не размер напыляемых частиц. При использовании аргон-гелиевой смеси плазменная струя (с более низкой рабочей температурой) снижает степень обезуглероживания частиц WC и, таким образом, повышает их объемную долю в покрытии. Поскольку покрытия, напыленные Ar/He-струей, имели более высокую объемную долю частиц WC, они характеризовались более высокими значениями твердости, износостойкости, а также ударной вязкости. Авторы сообщают, что при плазменном напылении Ar/He-струей большую износостойкость имели покрытия из наноразмерного порошка, а не из микронного.

Анализируя данные, приведенные в литературе, можно сделать следующий вывод: на сегодняшний день HVOF- и APS-методы получения керметных покрытий достаточно подробно исследованы. Показано, что после отработки технологии напыления конкретного порошка можно достоверно регулировать свойства получаемых покрытий. В связи с вышеизложенным **целью настоящей работы** является исследование влияния режимов HV-APS с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа на структуру, фазовый состав и свойства покрытий WC-Co.

Методика экспериментального исследования

Объектом исследований в настоящей работе являлись покрытия, сформированные из коммерческого гранулированного порошка WC-10Co4Cr фракцией 15–38 мкм. Сверхзвуковое плазменное напыление HV-APS проводили с использованием электродугового плазматрона

ПНК-50, разработанного в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. В качестве подложки подготавливали шайбы из стали 20 ($d = 20$ мм, $s = 7,5$ мм). Покрытие наносили на торцевую поверхность шайб. Перед напылением порошка торцевую поверхность подложек очищали при помощи пескоструйной обработки. Режимы HV-APS приведены в табл. 1. В качестве изменяемого параметра выступали дистанция напыления (170 и 250 мм) и ток дуги (140, 170 и 200 А). В качестве плазмообразующего, транспортирующего и фокусирующего газа использовали воздух с добавкой 4 об. % метана.

Структурные исследования и измерения пористости и микротвердости проводили на поперечных микрошлифах, подготовка которых заключалась в следующем: механическое шлифование при помощи суспензий с частицами Al_2O_3 зернистостью 9, 6, 3 и 1 мкм и финишное полирование на сукне с использованием коллоидного раствора оксида кремния зернистостью 0,04 мкм. Для исследования структуры покрытий использовали оптический микроскоп Olympus GX-51 (Olympus, Япония), оснащенный программным обеспечением OLYMPUS Stream Image Analysis Stream Essentials 1.9.1 для измерения пористости материалов. Кроме того, структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA использовали для изучения фазового состава в $CuK\alpha$ -излучении. Режимы съемки: время $t = 3$ с, шаг $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Микротвердость покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 100 г [21].

Испытания на износостойкость проводили в соответствии с ASTM G65. Для данного испытания наносили покрытие толщиной 300–350 мкм на пластины размером $25 \times 75 \times 3$ мм. Во время испытания абразивный материал (электрокорунд) подавался в зону трения и прижимался к образцу вращающимся резиновым роликом. Образец прижимался к ролику рычагом с усилием 44 Н. Частота вращения ролика – 60 об/мин. По результатам взвешивания определяли среднеарифметическое значение потери массы.

Для качественной оценки адгезии покрытий проводили загиб образцов на 180° вокруг направляющего ролика диаметром 10 мм по ASTM E-290.

Результаты и их обсуждение

Микроструктурные характеристики покрытий

На рис. 1 представлены рентгенограммы исходного порошка и покрытий, полученных при разных режимах напыления. Видно, что основными фазами порошка являются карбид вольфрама WC (51-939) и кобальт Co (15-806) (рис. 1, а).

Рентгенограммы всех покрытий (рис. 1, б–ж) практически одинаковы: основными фазами являются WC (65-4539) и W_2C (35-776). Интенсивность пиков фазы WC в покрытиях меньше, чем в порошке, что свидетельствует о меньшей его объемной доле. Фаза W_2C образуется в результате обезуглероживания WC по реакциям [22]:

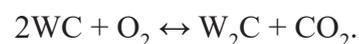
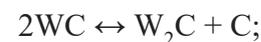


Таблица 1

Table 1

Режимы HV-APS
The modes of HV-APS

Дистанция напыления, мм / Spraying distance, mm	Ток дуги, А / Arc current, A	Обозначение режимов / Spraying modes
170	140	170/140
	170	170/170
	200	170/200
250	140	250/140
	170	250/170
	200	250/200

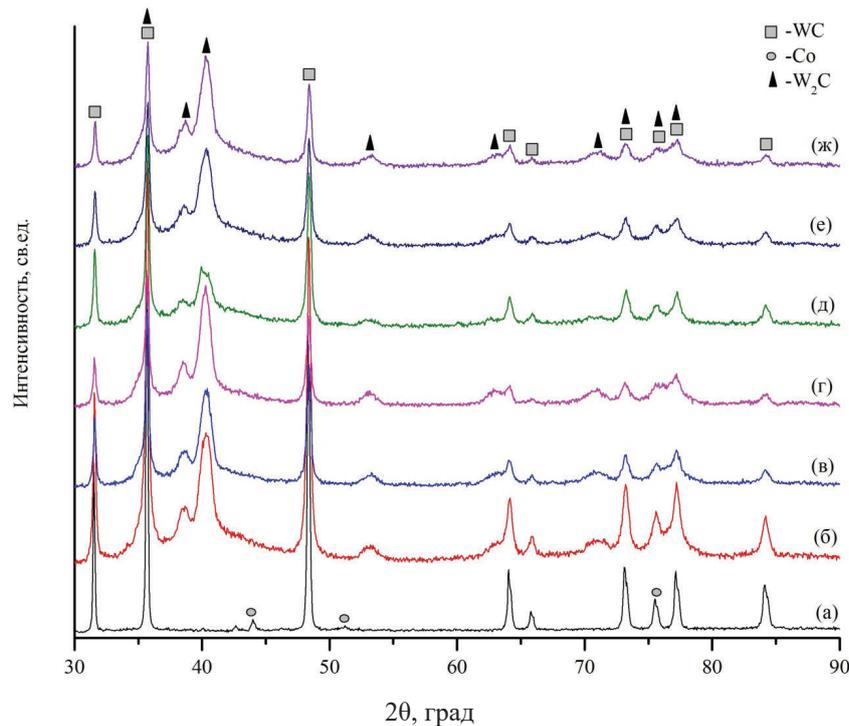


Рис. 1. Рентгенограммы порошка (а) и покрытий, полученных при разных режимах:

б – 170/140; в – 170/170; г – 170/200; д – 250/140; е – 250/170; жс – 250/200

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of powder (a) and coatings formed at different modes:

б – 170/140; в – 170/170; г – 170/200; д – 250/140; е – 250/170; жс – 250/200

Смещение дифракционных максимумов фазы W_2C указывает на изменение межатомных расстояний.

Отсутствие кобальта на рентгенограммах покрытий объясняется тем, что при напылении часть WC растворяется в кобальтовой матрице, а при быстром охлаждении на холодной подложке или уже затвердевших сплэтах формируется аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор $Co(W,C)$. На его образование указывает широкое дифракционное гало в диапазоне $2\theta = 37\text{--}47^\circ$. Согласно данным работ [22–24] в матрице также возможно формирование η -фаз (Co_3W_3C , Co_2W_4C или Co_6W_6C), хотя рентгеноструктурным анализом они идентифицированы не были.

На рис. 2, а–е приведены изображения микроструктуры покрытий, полученных при разных режимах. Их толщина в среднем составляет 150–200 мкм. Все покрытия характеризуются высокой плотностью и хорошей адгезией с подложкой. Отсутствие трещин и выкрошившихся в процессе подготовки карбидных частиц свидетельствует о высокой когезионной прочности.

Все покрытия имеют слоистую структуру, характерную для газотермического напыления.

Стоит отметить, что полученные покрытия характеризуются значительной разницей объемной доли карбидов. На рис. 2, а–в (верхний ряд) представлены покрытия, полученные на дистанции напыления 170 мм, а на рис. 2, г–е (нижний ряд) – 250 мм. При напылении изменяли также силу тока: 140 А (рис. 2, а, г), 170 А (рис. 2, б, д) и 200 А (рис. 2, в, е). Видно, что дистанция напыления, как и сила тока, оказывает значительное влияние на количество карбидов. Зависимость объемной доли карбидов от режимов напыления приведена на рис. 3. Видно, что количество WC и W_2C уменьшается с увеличением силы тока и дистанции напыления. Это связано с тем, что с повышением силы тока повышается температура плазменного потока, что приводит к более высокому нагреву частиц WC. Максимальное количество карбидов (49 %) наблюдается в покрытиях, полученных в режиме 170/140; минимальное (25 %) – в режиме 250/200.

На рис. 4, а представлено РЭМ-изображение покрытия, полученное в режиме BSE. Видно, что

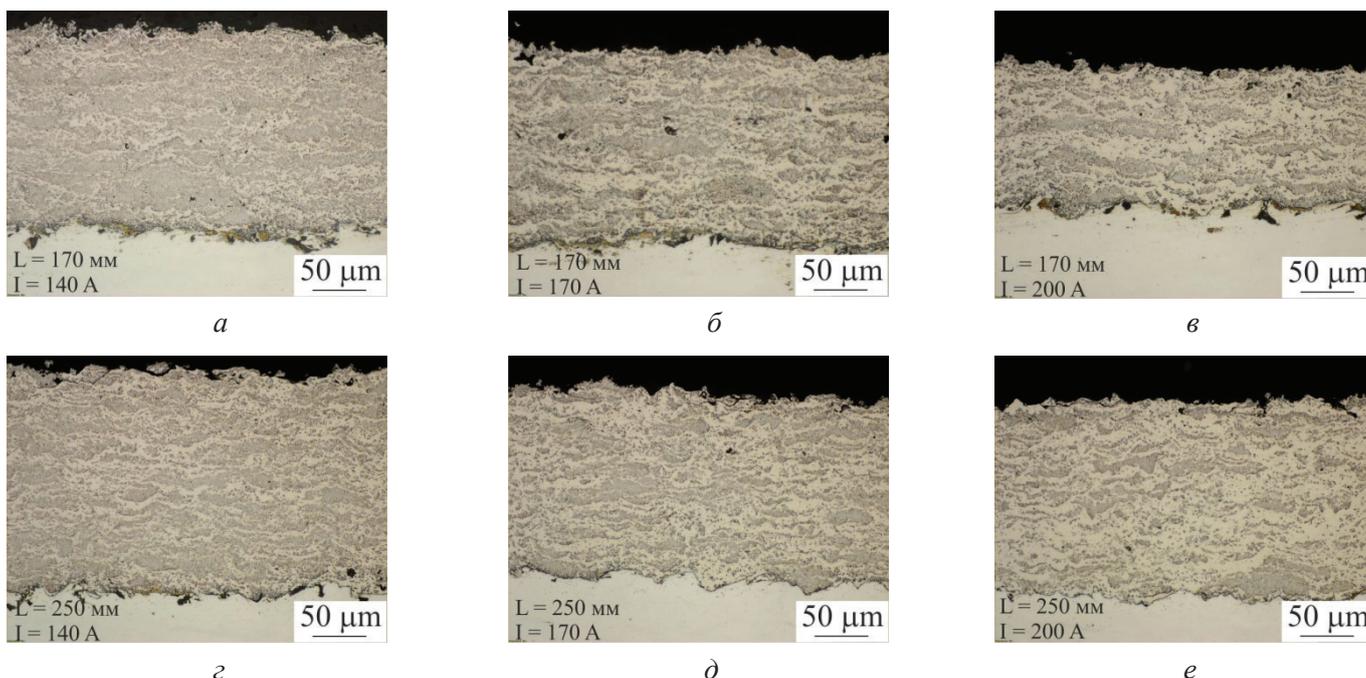


Рис. 2. Структура покрытий HV-APS. Режимы:
a – 170/140; *б* – 170/170; *в* – 170/200; *г* – 250/140; *д* – 250/170; *е* – 250/200
Fig. 2. The structure of HV-APS coatings. The modes:
a – 170/140; *б* – 170/170; *в* – 170/200; *г* – 250/140; *д* – 250/170; *е* – 250/200

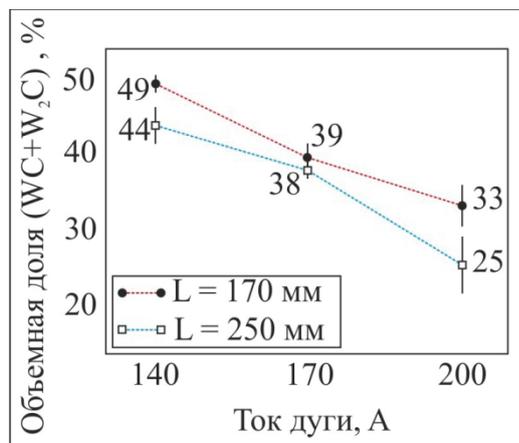


Рис. 3. Зависимость количества карбидов WC+W₂C в покрытии от режимов напыления
Fig. 3. Dependence of the WC+W₂C mass fraction on spraying modes

частицы WC расположены внутри сплэтов и имеют разные размеры (участки 4 и 5 на рис. 4, *a*). В покрытиях также наблюдались участки, которые вообще не содержат частиц WC (участки 1–3 на рис. 4, *a*). В зависимости от того, сколько времени частицы карбида вольфрама находятся при высоких температурах, степень их разложения будет отличаться. Известно, что при нагреве в плазменной струе частицы WC начина-

ют оплавляться, и атомы вольфрама и углерода диффундируют в жидкую кобальтовую матрицу. При охлаждении расплавленного материала со скоростями намного выше критических фиксируется аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор Co(W, C). На схеме (рис. 4, *б*) показано, что степень обезуглероживания частиц WC неодинакова в разных сплэтах. Так, в сплэтах с более темной матрицей (участок 5 на рис. 4, *a*) частицы практически не оплавляются в отличие от сплэтов с более светлой матрицей (участок 4 на рис. 4, *a*). В зависимости от количества вольфрама и углерода, растворенных в кобальте, матрица характеризуется различными оттенками серого цвета. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (табл. 2) в более светлых участках (участок 1 на рис. 4, *a*) содержится больше вольфрама, а в более темных (участок 3 на рис. 4, *a*) – меньше. Полученные данные хорошо согласуются с данными работы [5].

Механические свойства и износостойкость покрытий

Результаты измерений средних значений микротвердости покрытий в зависимости от режима напыления представлены на рис. 5. Видно,

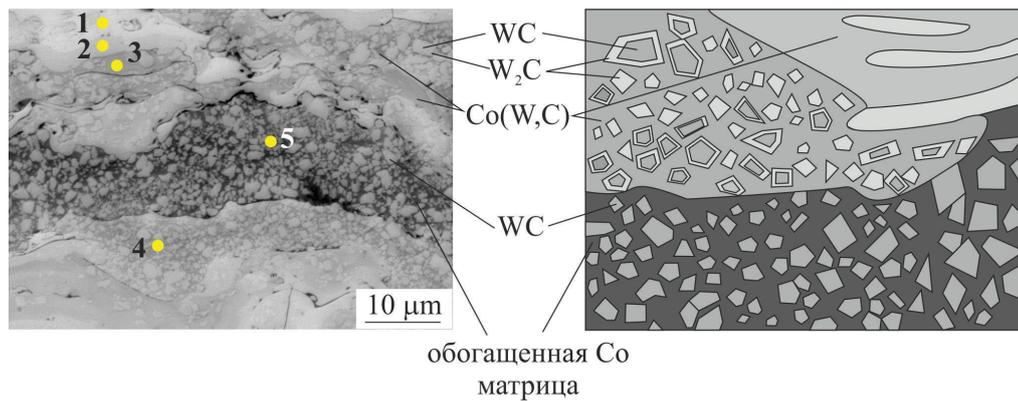


Рис. 4. РЭМ-изображение (а) и схема (б) покрытия WC-Co
 Fig. 4. SEM micrograph (a) and scheme (б) of plasma WC-Co coating

Таблица 2
 Table 2

Микрорентгеноспектральный анализ покрытий
 Electron microprobe analysis of coatings

№ области / № area	Химический элемент, вес. % / Chemical element, wt. %			
	W	Co	C	Cr
1	92,84	2,89	3,52	0,74
2	87,69	3,28	8,23	0,8
3	80,59	7,95	7,45	4
4	79,17	9,08	6,83	4,91
5	77,65	10,52	7,87	3,95

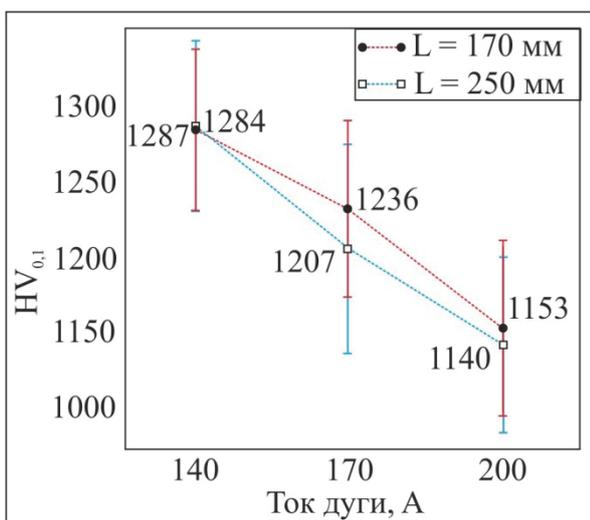


Рис. 5. Микротвердость покрытий, полученных при разных режимах
 Fig. 5. Microhardness of coatings formed on different modes

что увеличение силы тока способствует снижению значений микротвердости, это можно объяснить уменьшением объемной доли карбидов в

покрытиях. Влияние дистанции напыления незначительно, при этом твердость покрытий, полученных на 250 мм, чуть ниже. Максимальная микротвердость (1284 и 1287 HV_{0,1}) характерна для покрытий, полученных в режимах 170/140 и 250/140. Самые низкие значения микротвердости (1153 и 1140 HV_{0,1}) наблюдаются у покрытий, полученных в режимах 170/200 и 250/200. В среднем микротвердость участков с карбидами составляет 1432 ± 107 HV_{0,1}, матрицы – 772 ± 93 HV_{0,1}. Эти данные хорошо согласуются с данными работ [9, 25].

Результаты испытаний покрытий на износ о нежестко закрепленные частицы абразива приведены на рис. 6. Видно, что максимальная износостойкость характерна для образцов с покрытиями, полученными в режиме 170/140 (относительная износостойкость 0,21), минимальная – для образцов, полученных в режиме 250/200 (относительная износостойкость 0,14). Снижение износостойкости можно объяснить уменьшением объемной доли карбидной фазы,

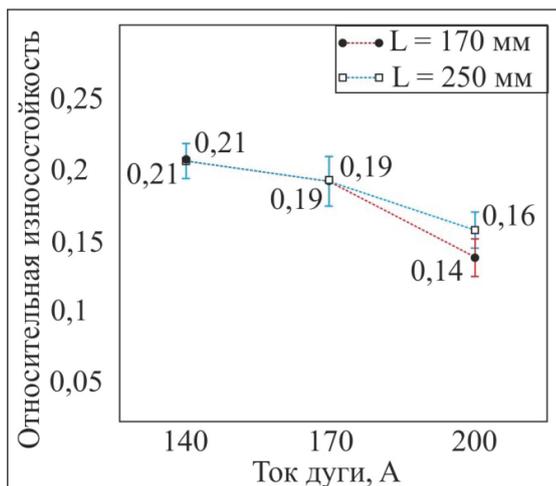


Рис. 6. Относительная износостойкость покрытий, полученных при разных режимах

Fig. 6. Relative wear resistance of coatings formed by different modes

что также хорошо коррелирует с результатами измерений микротвердости.

Для оценки адгезии покрытий в работе были проведены испытания на направляемый загиб 180° . Во всех случаях покрытия растрескались в области изгиба, но не отслоились. На рис. 7 представлены изображения поверхности пластин с покрытиями, полученными в режимах 170/140 (рис. 7, а) и 250/200 (рис. 7, б), после испытания. Видно, что трещины в покрытиях практически прямолинейны, без разветвлений. Расстояние между трещинами увеличивается с увеличением тока и дистанции напыления. Полученные данные свидетельствуют о высокой адгезии покрытий.

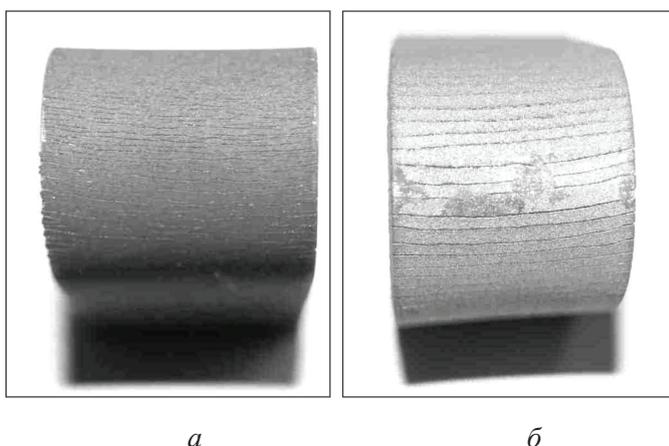


Рис. 7. Образцы с покрытиями после испытаний на изгиб:

а – 170/140; б – 250/200

Fig. 7. The specimens with coating after bend test:

а – 170/140; б – 250/200

Выводы

1. Метод HV-APS позволяет формировать высококачественные металлокерамические покрытия WC-Co, характеризующиеся высокой плотностью, отсутствием трещин и оксидных пленок.

2. Согласно данным, полученным с помощью РЭМ и РФА, покрытия состоят из частиц WC и W_2C , равномерно распределенных в металлической матрице. Матрица представляет собой аморфный или нанокристаллический пересыщенный твердый раствор Co(W,C).

3. Методом оптической микроскопии показано, что дистанция напыления, как и сила тока, оказывает значительное влияние на объемную долю карбидов. Максимальное количество карбидов (49 %) наблюдается в покрытиях, полученных в режиме 170/140, минимальное (25 %) – в покрытиях, полученных в режиме 250/200.

4. Установлено, что максимальная микротвердость (1284 и 1287 $HV_{0,1}$) характерна для покрытий, полученных в режимах 170/140 и 250/140; минимальные значения микротвердости (1153 и 1140 $HV_{0,1}$) наблюдаются у покрытий, полученных в режимах 170/200 и 250/200.

5. Выявлено, что максимальная износостойкость характерна для образцов с покрытиями, полученными в режиме 170/140 (относительная износостойкость 0,21), минимальная – для образцов, полученных в режиме 250/200 (относительная износостойкость 0,14).

6. Показано, что все покрытия характеризуются высокой адгезией. При испытаниях на трехточечный изгиб покрытия не отслаивались.

Список литературы

1. Surface modification of air plasma spraying WC-12%Co cermet coating by laser melting technique / M. Afzal, M. Ajmal, A. Nusair Khan, A. Hussain, R. Akhter // Optics Laser. – 2014. – Vol. 56. – P. 202–206. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.08.017.

2. Microstructure and cavitation erosion behavior of WC-Co-Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying / Y. Wu, S. Hong, J. Zhang, Z. He, W. Guo, Q. Wang, G. Li // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2012. – Vol. 32. – P. 21–26. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.01.002.

3. Interdependence of slurry erosion wear performance and residual stress in WC-12wt%Co and WC-10wt%VC-12wt%Co HVOF coatings / A.M. Venter,

- V. Luzin, D. Maraisa, N. Sacks, E.N. Ogunmuyiwa, P.H. Shipway // *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol. 87. – P. 105101. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105101.
4. Mechanical properties of WC-Co coatings with different decarburization levels / X. Wu, Z.M. Guo, H.B. Wang, X.Y. Song // *Rare Metals*. – 2014. – Vol. 33, iss. 3. – P. 313–317. – DOI: 10.1007/s12598-014-0257-8.
5. Microstructure and wear behavior of conventional and nanostructured plasma-sprayed WC-Co coatings / E. Sanchez, E. Bannier, M.D. Salvador, V. Bonache, J.C. Garcia, J. Morgiel, J. Grzonka // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – Vol. 19, iss. 5. – P. 964–974. – DOI: 10.1007/s11666-010-9480-5.
6. Liu S.L., Zheng X.P., Geng G.Q. Influence of nano-WC-12Co powder addition in WC-10Co-4Cr AC-HVAF sprayed coatings on wear and erosion behavior // *Wear*. – 2010. – Vol. 269, iss. 5–6. – P. 362–367. – DOI: 10.1016/j.wear.2010.04.019.
7. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder / H. Wang, Q. Qiu, M. Gee, C. Hou, X. Liu, X. Song // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 191. – P. 108586. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108586.
8. Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF-sprayed WC-12Co coatings / U. Selvadurai, P. Hollingsworth, I. Baumann, B. Hussong, W. Tillmann, S. Rausch, D. Biermann // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 268. – P. 30–35. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.055.
9. Ghadami F., Sohi M.H., Ghadami S. Effect of bond coat and post-heat treatment on the adhesion of air plasma sprayed WC-Co coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 261. – P. 289–294. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.016.
10. Yin B., Zhou H.D., Yi D.L. Microsliding wear behavior of HVOF sprayed conventional and nanostructured WC-12Co coatings at elevated temperatures // *Surface Engineering*. – 2010. – Vol. 26, iss. 6. – P. 469–477. – DOI: 10.1179/026708410X12506870724352.
11. Effects of the dispersion time on the microstructure and wear resistance of WC/Co-CNTs HVOF sprayed coatings / M.A. Rodriguez, L. Gil, S. Camero, N. Frety, Y. Santana, J. Caro // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 258. – P. 38–48. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.10.014.
12. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating / C. Guo, J. Chen, J. Zhou, J. Zhao, L. Wang, Y. Yu, H. Zhou // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 206. – P. 2064–2071. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.06.005.
13. Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding / J. Zhang, J. Lei, Z. Gu, F. Tantai, H. Tian, J. Han, Y. Fang // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 393. – P. 125807. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125807.
14. Jalali Azizpour M., Tolouei-Rad M. The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45, iss. 11. – P. 13934–13941. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.091.
15. HVOF sprayed WC-Co coatings: microstructure, mechanical properties and friction moment prediction / T. Sahraoui, S. Guessasma, M. Ali Jeridane, M. Hadji // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 3. – P. 1431–1437. – DOI: 10.1016/j.matdes.2009.08.037.
16. He J., Schoenung J.M. A review on nanostructured WC-Co coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 157, iss. 1. – P. 72–79. – DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00141-X.
17. Simultaneous increase of friction coefficient and wear resistance through hvof sprayed WC-(nano WC-Co) / P.H. Gao, B.Y. Chen, W. Wang, H. Jia, J.P. Li, Z. Yang, Y.C. Guo // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 363. – P. 379–389. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.042.
18. Ghosh G., Sidpara A., Bandyopadhyay P.P. Understanding the role of surface roughness on the tribological performance and corrosion resistance of WC-Co coating // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 378. – P. 125080. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125080.
19. Dent A.H., Palo S., Sampath S. Examination of the wear properties of HVOF sprayed nanostructured and conventional WC-Co cermets with different binder phase contents // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2002. – Vol. 11 (4). – P. 551–558. – DOI: 10.1361/105996302770348691.
20. Baik K.H., Kim J.H., Seong B.G. Improvements in hardness and wear resistance of thermally sprayed WC-Co nanocomposite coatings // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 449–451. – P. 846–849. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.295.
21. Интерметаллидные покрытия Al₃Ti, сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки / Е.Е. Корниенко, А.Д. Вялова, В.С. Шикалов, В.Ф. Косарев, Т.М. Видюк // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 80–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89.
22. Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC-Co during plasma spraying / Q. Zhan, L. Yu, F. Ye, Q. Xue, H. Li // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 206. – P. 4068–4074. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.091.

23. Decarburization mechanisms of WCeCo during thermal spraying: insights from controlled carbon loss and microstructure characterization / J. Yuan, Q. Zhan, J. Huang, S. Ding, H. Li // *Materials Chemistry and Physics*. – 2013. – Vol. 142. – P. 165–171. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.06.052.

24. FIB-SEM sectioning study of decarburization products in the microstructure of HVOF-sprayed WC-Co coatings / V. Katranidis, S. Gu, D.C. Cox, M.J. Whit-

ing, S. Kamnis // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 898–908. – DOI: 10.1007/s11666-018-0721-3.

25. *Fu D., Xiong H., Wang Q.* Microstructure evolution and its effect on the wear performance of HVOF-sprayed conventional WC-Co coating // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – Vol. 25. – P. 4352–4358. – DOI: 10.1007/s11665-016-2278-y.

Конфликт интересов

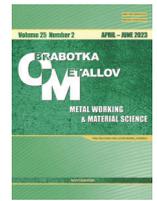
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Structure and properties of WC-10Co4Cr coatings obtained with high velocity atmospheric plasma spraying

Elena Kornienko^{1, a,*}, Igor Gulyaev^{2, b}, Viktor Kuzmin^{2, c}, Alexandr Tambovtsev^{2, d}, Pavel Tyryshkin^{2, e}

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

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e.kornienko@corp.nstu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5186-6793>, gulyaev@itam.nsc.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0003-1635-9352>, alsetam123@icloud.com,

^e <https://orcid.org/0009-0009-8125-6772>, pavel99730@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 March 2023

Revised: 02 April 2023

Accepted: 08 April 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Plasma spraying

High velocity atmospheric plasma

spraying

Coating

WC-Co

HV-APS

Funding

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education (project No. 121030500145-0).

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Carbon steel is often used for the manufacture of various machine parts, but its operation in aggressive conditions (operation of steel parts under conditions of wear, high temperatures and aggressive corrosive environments) contributes to an extreme decline in properties, up to failure. To solve this problem the modification of the working surfaces of steel parts can be used. It increases its wear resistance, corrosion resistance, and service life. Metal-ceramic coatings based on WC are often used to improve the hardness, wear resistance and corrosion resistance of steel parts. The work purpose is to study the effect of high velocity atmospheric plasma spraying (HV-APS) modes on the structure, phase composition and properties of WC-Co coatings. **Materials and methods.** 86% WC-10% Co-4% Cr coatings were deposited on a mild steel substrate with help of the HV-APS method. The structure and phase composition of the coatings were analyzed using optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray phase analysis. In addition, the results of measurements of porosity, microhardness, wear resistance, as well as a qualitative assessment of the adhesion are shown in this paper. Results and discussion. It is shown that all coatings are characterized by high density, absence of cracks and oxide films. Using the SEM and XRD methods, it is found that the coatings contain WC and W₂C particles uniformly distributed in the metal matrix. The matrix is an amorphous or nanocrystalline supersaturated Co(W,C) solid solution. The maximum amount of carbides (49 %) is observed in coatings obtained by deposition from a distance of 170 mm, arc current – 140 A; the minimum (25 %) is observed in coatings obtained by deposition from a distance of 250 mm, arc current – 200 A. The coatings with the maximum amount of carbides have the maximum values of microhardness (1,284 HV_{0.1}) and wear resistance. It is established that all coatings are characterized by high adhesion.

For citation: Kornienko E.E., Gulyaev I.P., Kuzmin V.I., Tambovtsev A.S., Tyryshkin P.A. Structure and properties of WC-10Co4Cr coatings obtained with high velocity atmospheric plasma spraying. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 81–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-81-92. (In Russian).

References

1. Afzal M., Ajmal M., Nusair Khan A., Hussain A., Akhter R. Surface modification of air plasma spraying WC-12% Co cermet coating by laser melting technique. *Optics Laser*, 2014, vol. 56, pp. 202–206. DOI: 10.1016/j.optlasec.2013.08.017.

* 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: e.kornienko@corp.nstu.ru

2. Wu Y., Hong S., Zhang J., He Z., Guo W., Wang Q., Li G. Microstructure and cavitation erosion behavior of WC-Co-Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, vol. 32, pp. 21–26. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.01.002.
3. Venter A.M., Luzin V., Maraisa D., Sacks N., Ogunmuyiwa E.N., Shipway P.H. Interdependence of slurry erosion wear performance and residual stress in WC-12wt%Co and WC-10wt%VC-12wt%Co HVOF coatings. *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, vol. 87, p. 105101. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105101.
4. Wu X., Guo Z.M., Wang H.B., Song X.Y. Mechanical properties of WC-Co coatings with different decarburization levels. *Rare Metals*, 2014, vol. 33, iss. 3, pp. 313–317. DOI: 10.1007/s12598-014-0257-8.
5. Sanchez E., Bannier E., Salvador M.D., Bonache V., Garcia J.C., Morgiel J., Grzonka J. Microstructure and wear behavior of conventional and nanostructured plasma-sprayed WC-Co coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, iss. 5, pp. 964–974. DOI: 10.1007/s11666-010-9480-5.
6. Liu S.L., Zheng X.P., Geng G.Q. Influence of nano-WC-12Co powder addition in WC-10Co-4Cr AC-HVAF sprayed coatings on wear and erosion behavior. *Wear*, 2010, vol. 269, iss. 5–6, pp. 362–367. DOI: 10.1016/j.wear.2010.04.019.
7. Wang H., Qiu Q., Gee M., Hou C., Liu X., Song X. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder. *Materials and Design*, 2020, vol. 191, p. 108586. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108586.
8. Selvadurai U., Hollingsworth P., Baumann I., Hussong B., Tillmann W., Rausch S., Biermann D. Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF-sprayed WC-12Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 268, pp. 30–35. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.055.
9. Ghadami F., Sohi M.H., Ghadami S. Effect of bond coat and post-heat treatment on the adhesion of air plasma sprayed WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 261, pp. 289–294. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.016.
10. Yin B., Zhou H.D., Yi D.L. Microsliding wear behavior of HVOF sprayed conventional and nanostructured WC-12Co coatings at elevated temperatures. *Surface Engineering*, 2010, vol. 26, iss. 6, pp. 469–477. DOI: 10.1179/026708410X12506870724352.
11. Rodriguez M.A., Gil L., Camero S., Frerly N., Santana Y., Caro J. Effects of the dispersion time on the microstructure and wear resistance of WC/Co-CNTs HVOF sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 258, pp. 38–48. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.10.014.
12. Guo C., Chen J., Zhou J., Zhao J., Wang L., Yu Y., Zhou H. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, pp. 2064–2071. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.06.005.
13. Zhang J., Lei J., Gu Z., Tantai F., Tian H., Han J., Fang Y. Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 393, p. 125807. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125807.
14. Jalali Azizpour M., Tolouei-Rad M. The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, iss. 11, pp. 13934–13941. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.091.
15. Sahraoui T., Guessasma S., Ali Jeridane M., Hadji M. HVOF sprayed WC-Co coatings: microstructure, mechanical properties and friction moment prediction. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, iss. 3, pp. 1431–1437. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.08.037.
16. He J., Schoenung J.M. A review on nanostructured WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 157, iss. 1, pp. 72–79. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00141-X.
17. Gao P.H., Chen B.Y., Wang W., Jia H., Li J.P., Yang Z., Guo Y.C. Simultaneous increase of friction coefficient and wear resistance through hvof sprayed WC-(nano WC-Co). *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 363, pp. 379–389. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.042.
18. Ghosh G., Sidpara A., Bandyopadhyay P.P. Understanding the role of surface roughness on the tribological performance and corrosion resistance of WC-Co coating. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 378, p. 125080. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125080.
19. Dent A.H., Palo S., Sampath S. Examination of the wear properties of HVOF sprayed nanostructured and conventional WC-Co cermets with different binder phase contents. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, vol. 11 (4), pp. 551–558. DOI: 10.1361/105996302770348691.

20. Baik K.H., Kim J.H., Seong B.G. Improvements in hardness and wear resistance of thermally sprayed WC-Co nanocomposite coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 449–451, pp. 846–849. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.295.

21. Kornienko E., Vyalova A., Shikalov V., Kosarev V., Vidyuk T. Intermetallidnye pokrytiya Al_3Ti , sformirovannye pri pomoshchi kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya i termicheskoi obrabotki [Al_3Ti Intermetallic coatings obtained with help gas dynamic cold spray and heat treatment]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 80–89. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89.

22. Zhan Q., Yu L., Ye F., Xue Q., Li H. Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC–Co during plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, pp. 4068–4074. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.091.

23. Yuan J., Zhan Q., Huang J., Ding S., Li H. Decarburization mechanisms of WCeCo during thermal spraying: insights from controlled carbon loss and microstructure characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, vol. 142, pp. 165–171. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.06.052.

24. Katranidis V., Gu S., Cox D.C., Whiting M.J., Kamnis S. FIB-SEM sectioning study of decarburization products in the microstructure of HVOF-sprayed WC-Co coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, vol. 27, pp. 898–908. DOI: 10.1007/s11666-018-0721-3.

25. Fu D., Xiong H., Wang Q. Microstructure evolution and its effect on the wear performance of HVOF-sprayed conventional WC-Co coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, pp. 4352–4358. DOI: 10.1007/s11665-016-2278-y.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки

Андрей Балановский ^a, Ван Винь Нгуен ^{b, *}, Наталья Астафьева ^c, Руслан Гусев ^d

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>,  fuco.64@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6514-9015>,  nguyenvanvinh190596@gmail.com
^c  <https://orcid.org/0000-0003-4957-9597>,  anstella@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4217-1329>,  deltadota_99@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669-15:621.793.6

История статьи:

Поступила: 02 марта 2023
 Рецензирование: 24 марта 2023
 Принята к печати: 12 апреля 2023
 Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Плазменная наплавка
 Аморфный бор
 Бориды железа
 Покрытие

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из эффективных термохимических методов повышения твердости стали является борирование путем диффузии атомов бора в стальную поверхность при высоких температурах. В результате борирования на поверхности стали образуются покрытия, состоящие из столбчатых кристаллов FeB и Fe₂B. Объемная доля фаз и толщина покрытий зависят от температуры нагрева и химического состава исходного материала и насыщающей среды. Основным недостатком этих боридных слоев – их высокая хрупкость. Борирование за счет плазменного нагрева является одной из альтернатив процессу диффузионного борирования для сведения к минимуму хрупкости борированного слоя. **Цель работы:** формирование боридных покрытий на низкоуглеродистой стали с использованием технологии плазменной наплавки. **Методы исследования:** определение содержания химических элементов с помощью электронно-зондового микроанализатора, металлографические исследования, анализ фазового состава наплавленного слоя покрытия, а также измерение микротвердости покрытия после плазменной наплавки. **В работе исследованы** боридные покрытия, полученные на низкоуглеродистой стали 20 методом плазменной наплавки борсодержащей обмазки. В качестве легирующего элемента использовался аморфный бор в виде порошка. Параметром, варьируемым в процессе плазменной наплавки, являлась сила тока (120, 140 и 160 А). **Результаты и обсуждения.** На основании выполненных исследований установлено, что возможно получить боридные слои на поверхности стали с использованием метода плазменной наплавки. Отмечено, что поверхностный слой покрытия 1-го и 2-го образцов после плазменной наплавки имеет гетерогенную структуру, состоящую из рядов различных зон. Первая зона имеет заэвтектическое строение и состоит из первичных боридов FeB и Fe₂B, которые находятся в эвтектике, состоящей из Fe₂B и α-Fe. Вторая зона покрытия сверху границы с основным металлом представлена колониями эвтектики из Fe₂B и α-Fe. На 3-м образце структура имеет доэвтектическое строение из боридной эвтектики и первичных дендритов α-твердого раствора бора в железе. Максимальная твердость зафиксирована на поверхности первого образца и составляет 1575 HV. Глубина упрочненного слоя повысилась с увеличением силы тока, однако значение твердости и содержание бора уменьшались после обработки. Небольшой градиент твердости, наблюдаемый по глубине покрытия, а также постепенное снижение твердости благодаря наличию переходной зоны считаются благоприятными для хорошей адгезии боридного слоя к поверхности основного материала.

Для цитирования: Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки / А.Е. Балановский, В.В. Нгуен, Н.А. Астафьева, Р.Ю. Гусев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 93–103. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103.

Введение

Известно, что при эксплуатации стальных деталей и инструментов наиболее интенсивным внешним воздействиям подвергаются поверхностные слои, поэтому зачастую структура

и свойства поверхностных слоев оказывают решающее влияние на работоспособность изделий в целом. Следовательно, создание поверхностных слоев с необходимыми функциональными свойствами более выгодно, чем получение стали с аналогичными свойствами, а в ряде случаев является единственно возможным техническим решением [1–3].

Борирование – это один из перспективных методов повышения поверхностной твердости и износостойкости, стойкости к окислению

*Адрес для переписки

Нгуен Ван Винь, аспирант
 Иркутский национальный исследовательский технический университет,
 ул. Лермонтова, 83,
 664074, г. Иркутск, Россия
 Тел.: 89050160252, e-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

и коррозии деталей машиностроения. Существует несколько методов борирования: порошковый, химический и электролитический [4–7]. Отмечено, что процесс диффузионного борирования характеризуется большой длительностью (8–10 ч) и малой глубиной упрочнения (менее 200 мкм) [8–10]. Кроме того, насыщение поверхности стали бором обычно приводит к образованию FeB и Fe_2B , имеющих игольчатую микроструктуру. Такая микроструктура делает боридный слой очень хрупким. Это не позволяет эффективно использовать борированные детали в случаях, когда они подвергаются ударным и высоким локальным нагрузкам в процессе эксплуатации. Разрушение игольчатой структуры на поверхности приводит к образованию глобулярной структуры, которая может существенно повысить прочность и пластичность поверхности [11].

Насыщение поверхности стали бором с использованием лазера, электронного луча или плазменной дуги [12–15] позволяет сократить процесс борирования до 0,1–1 мин и получить глубину упрочнения в диапазоне 1–5 мм. В работе [16] использовали порошок CrB для легирования поверхности углеродистой стали с помощью лазера. Результаты показали, что при низкой скорости сканирования (10 мм/с) микроструктура и свойства легированного слоя однородны. Авторы работы [17] с помощью лазера проводили модификации структуры борированной стали без нарушения микроструктуры и свойств основного металла. Обнаружено, что лазерная модификация поверхности с мощностью 250 Вт уменьшает градиент твердости легированного слоя к основному металлу и приводит к значительному повышению пластичности и ударной вязкости стали. Авторы работы [18] исследовали процесс борирования и отметили, что лазерное борирование низкоуглеродистой стали может быть выполнено быстрее и без какой-либо предварительной обработки. Было обнаружено, что наиболее желательной микроструктурой для борирования лазером стали AISI 1018 является Fe_2B , которая имеет высокую твердость в диапазоне 1300–1700 HV и сжимающее напряжение на обрабатываемой поверхности. Порошковый карбид бора использовался для поверхностного упрочнения с помощью электронного луча [19]. Авторы отметили, что упрочненный слой

после обработки имеет дендритную структуру и твердость поверхности в шесть раз большую по сравнению со стальной подложкой. Авторами работы [20] проведено исследование структуры и свойств боридных покрытий, полученных на стали AISI 1018 с использованием источника плазменного нагрева. По результатам исследования отмечено, что толщина покрытий составляла от 1 до 1,5 мм, твердость – от 400 до 1600 HV. Скорость изнашивания борированных покрытий примерно на четыре порядка ниже скорости изнашивания стальной подложки. Из анализа литературы следует, что боридные покрытия на стальной подложке можно получить с использованием источников нагрева лазером, электронным лучом и плазменной дугой. Кроме этого отметим, что работ с использованием плазменного поверхностного нагрева для борирования сталей очень мало.

Целью настоящей работы является формирование боридных покрытий на низкоуглеродистой стали с помощью технологии плазменной наплавки. Для достижения поставленной цели проведены исследования микроструктуры и фазового состава, а также измерения микротвердости наплавленных покрытий.

Методика исследований

В качестве основного материала использовалась сталь 20, в состав которой входят следующие компоненты: C 0,17–0,24 %, Si 0,17–0,37 %, Mn 0,35–0,65 %, Ni до 0,25 %, S до 0,04 %, P до 0,04 %, Cr до 0,25 %, Fe ~ 98 %. Образцы вырезаны в виде пластины размером 75×15×15 мм и отшлифованы наждачной бумагой до зернистости 1200. Суспензию готовили путем смешивания порошка аморфного бора с клеем БФ-6 в весовой пропорции 1:1 и предварительно наносили на поверхность каждого образца. Толщина обмазки зафиксирована 1 мм. После этого образцы с обмазкой просушили в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 2 ч. Оборудование для плазменной наплавки схематически представлено на рис. 1. Во всех режимах обработки постоянными параметрами были напряжение 30 В, скорость перемещения стола с образцом 4 мм/с, расстояние между поверхностью образца и электродом 3 мм, диаметр сопла 5 мм и расход защитного газа 18 л/мин. В качестве переменного параметра служила сила тока (см. таблицу).

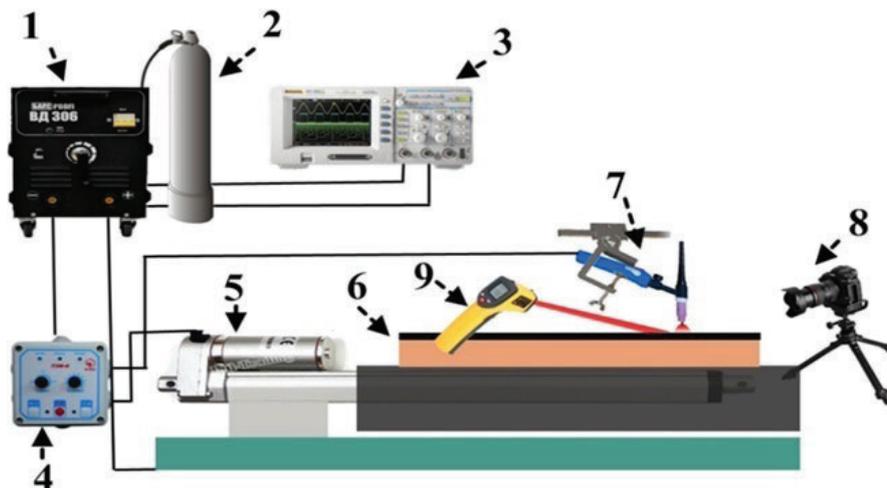


Рис. 1. Схема плазменной обработки:

1 – источник питания; 2 – баллон с аргоном; 3 – осциллограф; 4 – блок управления; 5 – электрический двигатель; 6 – образец с обмазкой; 7 – горелка; 8 – фотоаппарат; 9 – инфракрасный термометр

Fig. 1. Plasma-jet hard-facing scheme:

1 – power source; 2 – argon bottle; 3 – oscillation detector; 4 – control block; 5 – electric motor; 6 – specimen with smearing; 7 – plasma torch; 8 – camera; 9 – infra-red thermometer

Параметры процесса плазменной наплавки

Parameters of the plasma-jet hard-facing process

№ образца / Specimen No.	Ток, А / Current, A	Способ обработки / Processing method
1	120	Одна дорожка
2	140	
3	160	

Микроструктура наплавочных слоев исследована на оптическом микроскопе MET-2 и двухлучевом сканирующем микроскопе (многолучевая система) ЛВ-4500. Для определения содержания бора в наплавленном слое покрытия использовался метод электронно-зондового микроанализа.

Метод электронно-зондового микроанализа заключается в следующем: пучок высокоускоренных электронов падает на небольшую поверхность образца (~1 мкм²), далее выходящие рентгеновские лучи выбираются на основе их длины волны с использованием условия дифракции на принятом кристалле, а затем количественно определяется концентрация элементов путем сравнения интенсивностей характеристических рентгеновских лучей от каждого элемента, который присутствует в образце, с интенсивностью того же излучения, испускаемого эталоном. Исследование фазового состава покрытий после

плазменной наплавки проводилось на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 с использованием CuKα-излучения. Образцы сканировали в режиме пошагового сканирования в диапазоне 5–85° с шагом 5° при 40 кВ и 40 мА. Измерение микротвердости легированного слоя выполнялось с помощью микротвердомера Shimadzu HNV-2.

Результаты и их обсуждение

В процессе металлографических исследований образцов установлено, что способ плазменного оплавления обмазки, содержащей аморфный бор и связующее вещество клея БФ-6, позволяет получить слои покрытия без трещин и пор. На рис. 2, а представлена микроструктура поперечного сечения первого образца после плазменной наплавки.

Первая зона характеризуется наличием структуры эвтектического типа, которая состоит из первичных кристаллов боридных фаз FeB и Fe₂B различной морфологии, находящихся в эвтектической матрице, состоящей из Fe₂B и α-Fe (рис. 3).

Морфология боридов изменяется от овальной (рис. 4, а) до столбчатой (рис. 4, б). Кроме того, в наплавленном слое наблюдались бориды железа с неполным зарастанием граней (рис. 4, в).

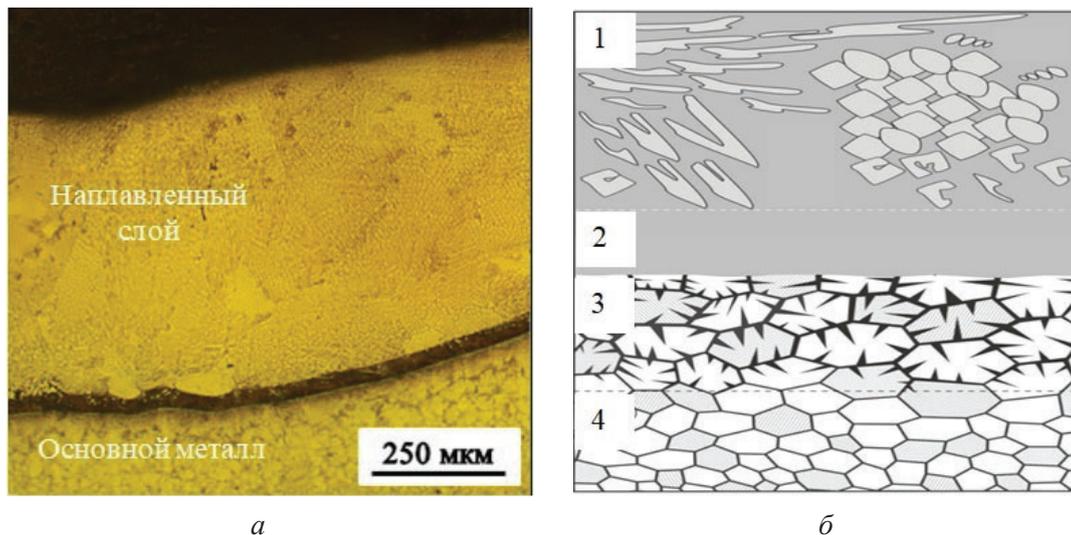


Рис. 2. Микрофотография (а) и схема (б) строения поперечного сечения первого образца после плазменной наплавки:

1 – зона заэвтектического типа с боридами железа различной морфологии; 2 – зона эвтектического строения; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл

Fig. 2. Micrograph (a) and scheme (b) of the 1st specimen cross section structure after plasma-jet hard-facing:

1 – hypereutectic zone with iron borides of various structures; 2 – eutectic zone; 3 – heat affected zone; 4 – base metal

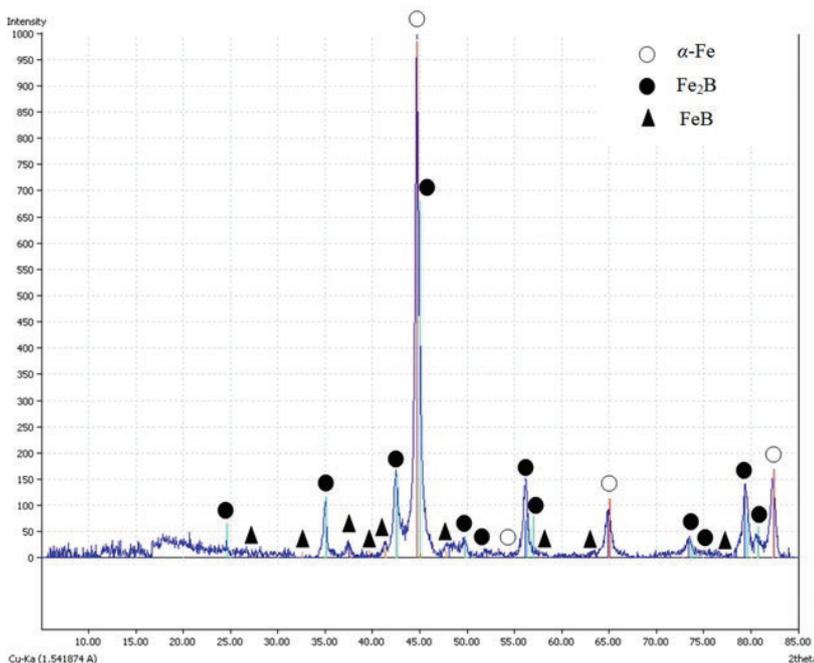


Рис. 3. Рентгенограмма первого образца после плазменной наплавки

Fig. 3. X-ray pattern of the first specimen after plasma-jet hard-facing

В области покрытия вблизи основного металла структура слоя шириной 100 мкм представлена лишь колониями эвтектики (рис. 4, з), потому что концентрации бора недостаточно для выделения боридов. Внизу наплавленного слоя

образовалась зона термического влияния с укрупнением зерен, связанным с нагревом до высоких температур. Далее расположена зона со структурой основного металла. Содержание бора в наплавленном слое составляет 12,35 %.

Получена также гетерогенная структура поверхностного слоя второго образца после плазменной наплавки (рис. 5). При этом отмечено, что доля первичных боридов в наплавленном слое покрытия намного меньше. Содержание бора в наплавленном слое уменьшается и составляет 9,23 %. Микроструктура слоя покрытия состоит из первичных боридов железа FeV и Fe₂V, которые находятся в матрице эвтектики, состоящей из Fe₂V и α-Fe, как показано на рис. 5.

Рентгеновский анализ показывает наличие первичных боридов FeV и Fe₂V на поверхности стали после плазменной наплавки (рис. 6). В нижней части покрытия около границы с основным металлом (рис. 5, з) микроструктура также представлена колониями эвтектики из Fe₂V и α-Fe, но ширина слоя увеличилась и составляет 200 мкм.

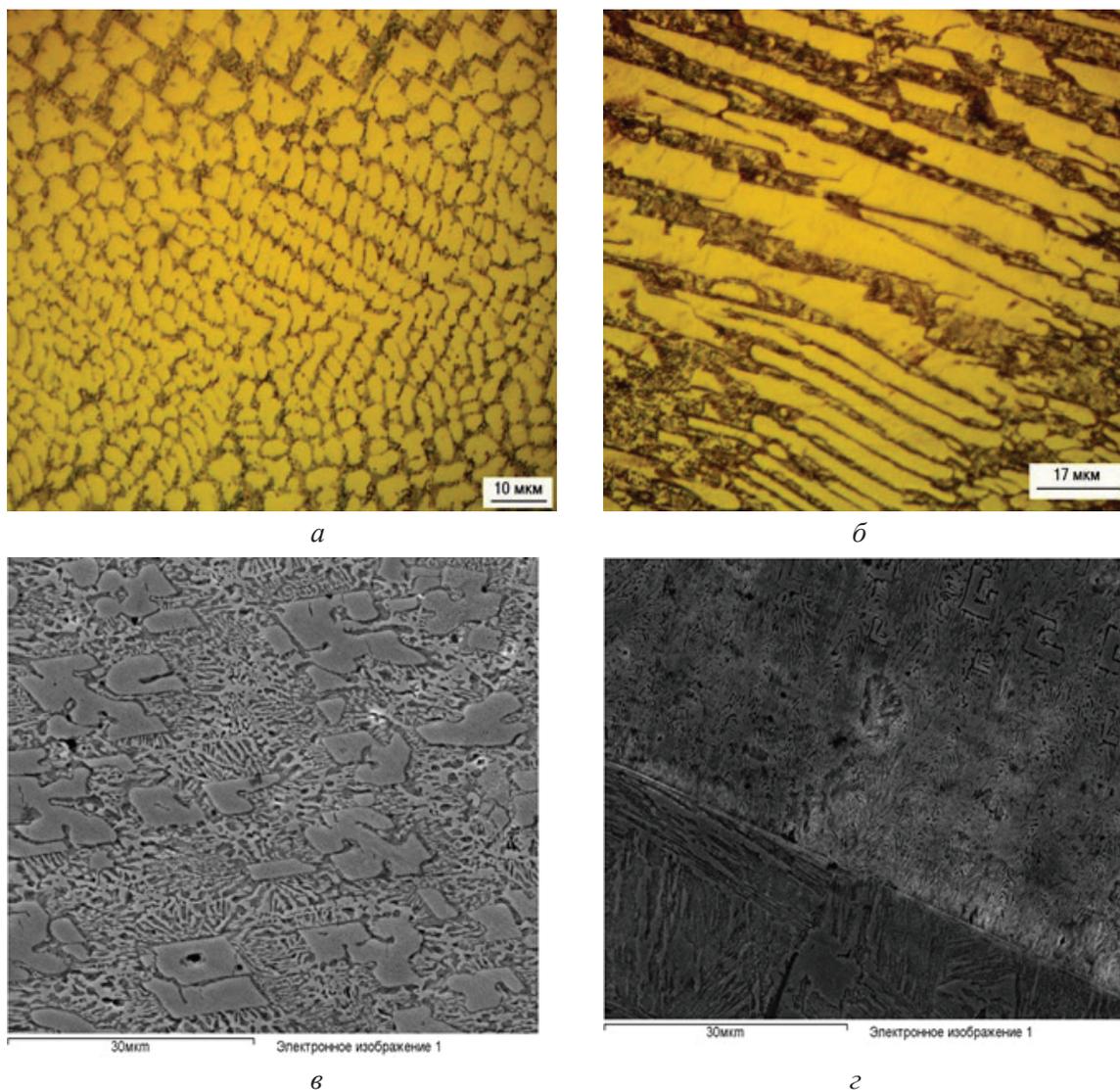


Рис. 4. Микроструктура первого образца после плазменной наплавки:

a, б, в – верхняя часть покрытия; *г* – нижняя часть покрытия около границы с основным металлом

Fig. 4. Microstructure of the 1st specimen after plasma-jet hard-facing:

a, б, в – the upper part of coating; *г* – the lower part of the coating near the boundary with the base metal

На рис. 7 представлена микроструктура наплавленного слоя покрытия третьего образца после плазменной наплавки. Он имеет доэвтектическую структуру, состоящую из боридной эвтектики и первичных дендритов α -твердого раствора бора в железе.

Согласно данным рентгеновского анализа (рис. 8) основными фазами покрытия являются Fe_2B и α -Fe. Содержание бора в наплавленном слое покрытия составляет 3,4 %. При рассмотрении бинарных фазовых диаграмм Fe-B видно, что микроструктуры хорошо согласуются с этими фазовыми диаграммами [18]. Известно, что сплавы железа с бором относятся к сплавам эвтектического типа, где эвтектика образована твердым раствором α -Fe и Fe_2B . При concentra-

ции бора 3,83 мас.%, сплав является 100 %-ной эвтектикой.

В ходе исследования микроструктуры наплавленного слоя покрытия после плазменной наплавки было проведено определение содержания бора по глубине слоя методом электронно-зондового микроанализа. Результаты определения содержания бора по глубине наплавленного слоя представлены на рис. 9. Из полученной диаграммы видно, что содержание бора в наплавленном слое покрытия уменьшается от поверхности покрытия до основного металла. При этом в наплавленном слое первого образца содержание бора выше на 1,5–2 %, чем у второго образца, и выше на 7–8 %, чем у третьего образца в зависимости от глубины наплавленного слоя.

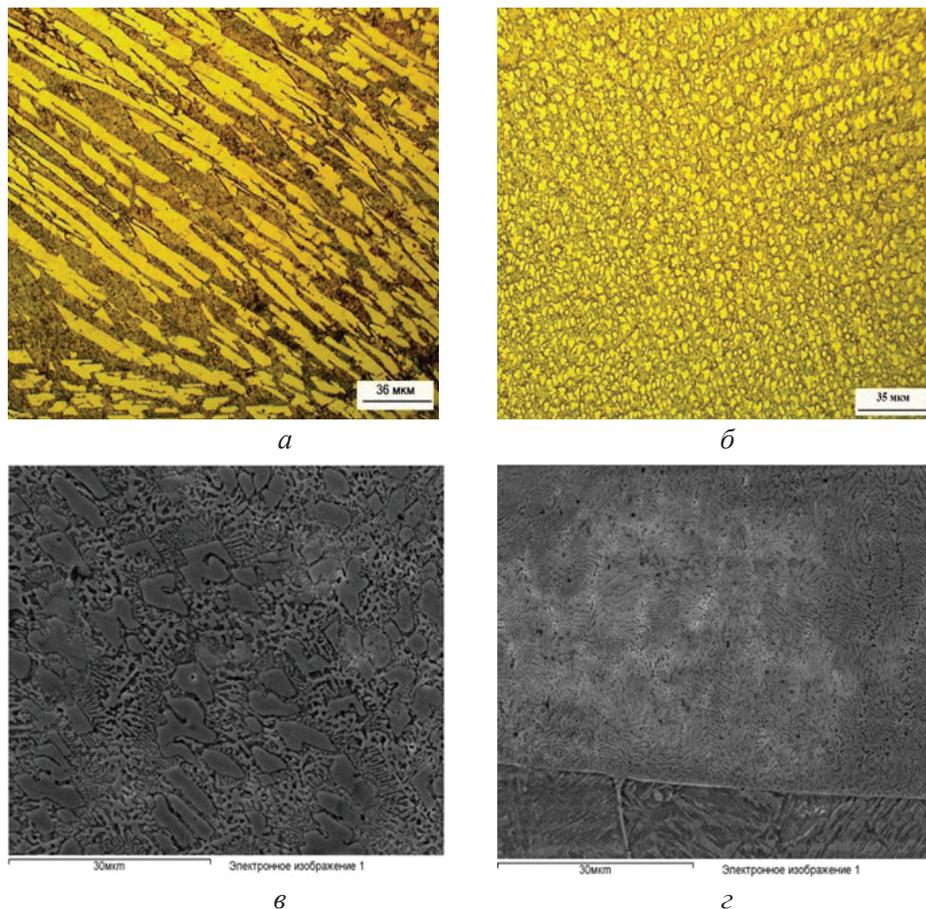


Рис. 5. Микроструктура второго образца после плазменной наплавки: *a, б, в* – верхняя часть покрытия; *г* – нижняя часть покрытия около границы с основным металлом

Fig. 5. Microstructure of the 2nd specimen after plasma-jet hard-facing: *a, б, в* – the upper part of coating; *г* – the lower part of the coating near the boundary with the base metal

На рис. 10 показано распределение микротвердости по глубине борированного слоя при различных силах тока после плазменного борирования. При увеличении силы тока от 120 до 160 А глубина упрочнения повышалась от 0,625 до 1,95 мм. Максимальная твердость 1547 HV для стали 20 наблюдалась на глубине 0,075 мм от поверхности слоя, что характерно для борирования за счет образования твердых боридов железа. Частицы боридов железа являются высокопрочной фазой, которая определяет степень упрочнения в легированном слое. Эти более высокие значения твердости связаны с более высоким содержанием бора, что привело к образованию большого количества первичных боридов FeB и Fe₂B. Увеличение тока до 140 А приводит к увеличению толщины верхнего покрытия до 1,125 мм, а максимальная твердость падает до 1293 HV. Это объясняется тем, что чем выше сила тока,

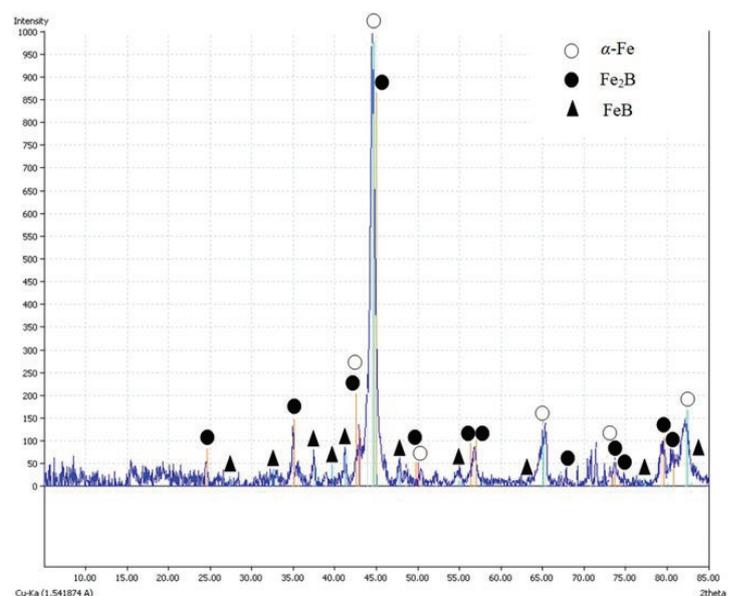


Рис. 6. Рентгенограмма второго образца после плазменной наплавки

Fig. 6. X-ray pattern of the 2nd specimen after plasma-jet hard-facing

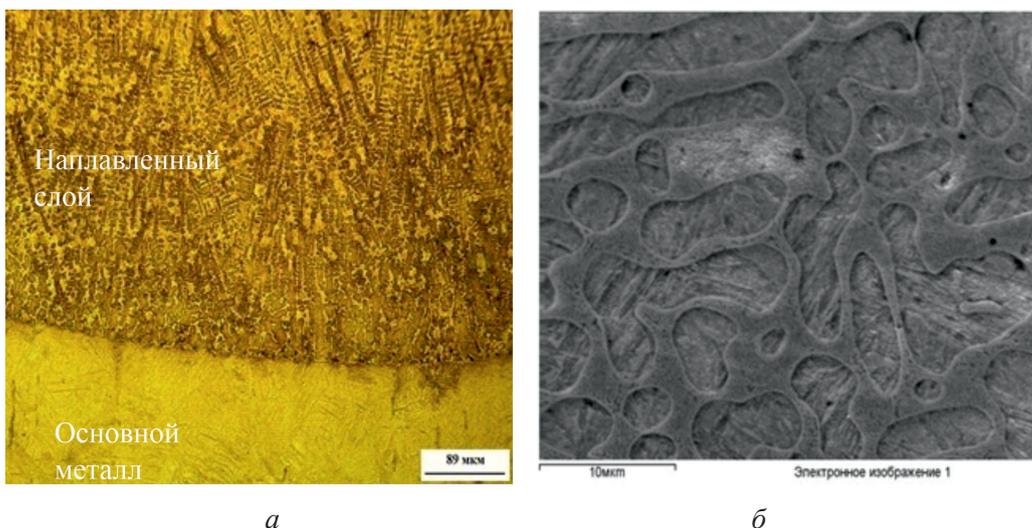


Рис. 7. Микроструктура наплавленного слоя третьего образца после плазменной наплавки:

a – оптический микроскоп; *б* – сканирующий электронный микроскоп

Fig. 7. Microstructure of the 3rd specimen after plasma-jet hard-facing:

a – optical microscopy; *б* – scanning electron microscopy

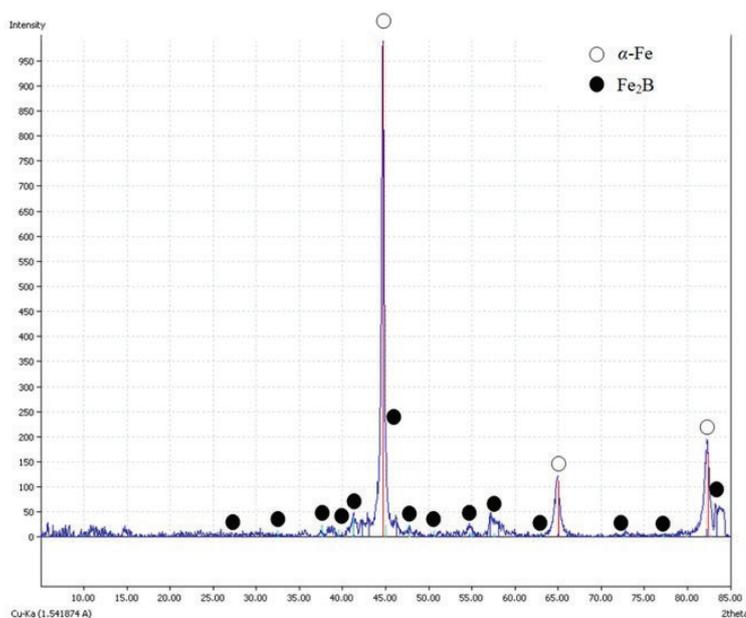


Рис. 8. Рентгенограмма третьего образца после плазменной наплавки

Fig. 8. X-ray pattern of the 3rd specimen after plasma-jet hard-facing

тем больше разбавление наплавочной смеси основным материалом. В результате этого концентрация бора в наплавленном слое уменьшалась, и наоборот, доля эвтектической составляющей увеличивалась. Самое низкое значение твердости легированного слоя измерено при силе тока 160 А и составляет 452 НВ, потому что поверхностный слой после борирования имеет доэвтектическую структуру и самое низкое содержание бора.

Интересно отметить, что небольшой градиент твердости, наблюдаемый по глубине покрытия, а также постепенное снижение твердости благодаря наличию переходной зоны считаются благоприятными для хорошей адгезии боридного слоя к поверхности основного материала. Например, резкий скачок твердости между боридными слоями и подложкой, наблюдаемый в слоях, полученных диффузионным борированием, считается одной из основных причин плохой адгезии, приводящей к отслаиванию и расщеплению покрытий.

Выводы

1. В ходе проведенных исследований установлено, что возможно получить боридные слои на поверхности стали с использованием технологии плазменной наплавки борсодержащей обмазки.
2. Отмечено, что поверхностный слой покрытия 1-го и 2-го образцов после плазменной наплавки имеет гетерогенную структуру, состоящую из рядов различных зон. Первая зона имеет заэвтектическое строение из первичных боридов FeB и Fe₂B, находящихся в эвтектике, которая состоит из Fe₂B и α -Fe. Вторая зона покрытия сверху границы с основным металлом представлена колониями эвтектики из Fe₂B и α -Fe. На 3-м

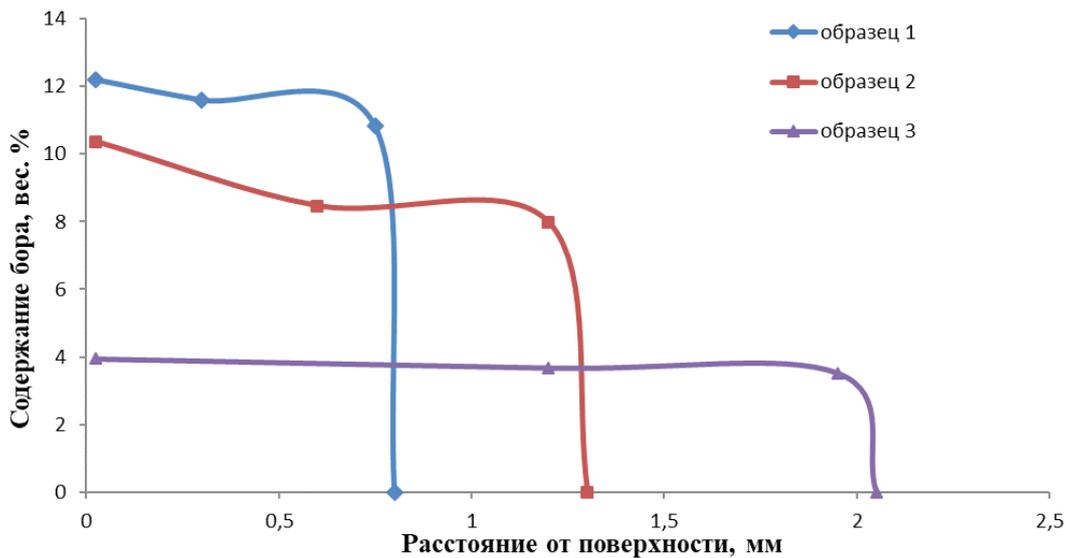


Рис. 9. Распределение бора по глубине слоя на стали после плазменной наплавки
 Fig. 9. Distribution of boron over the layer depth on steels after plasma-jet hard-facing

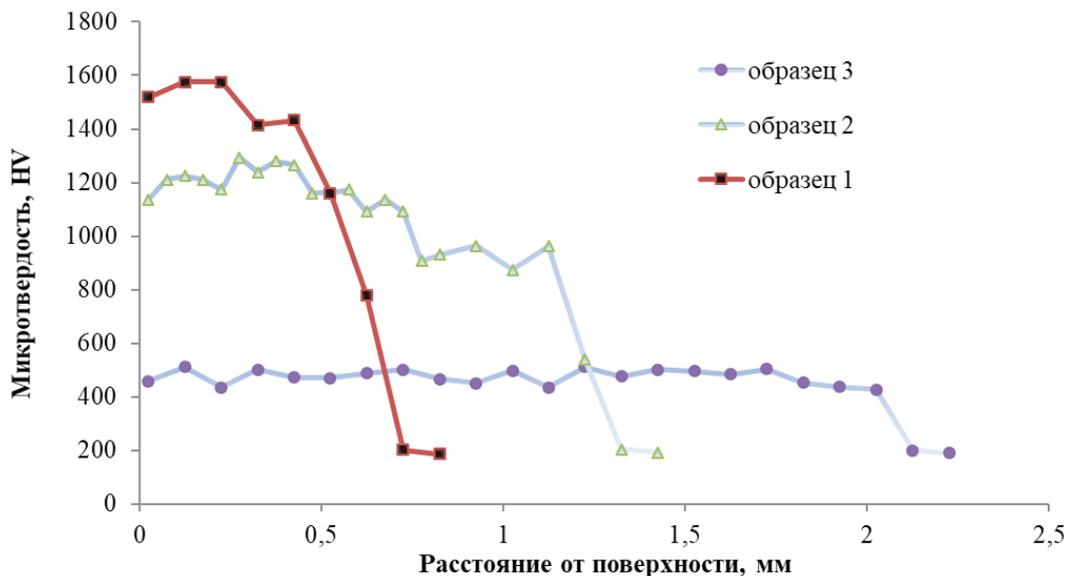


Рис. 10. Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев
 Fig. 10. Distribution of microhardness over the depth of hardened layers

образце структура имеет доэвтектическое строение из боридной эвтектики и первичных дендритов α -твердого раствора бора в железе.

3. Максимальная микротвердость легированного слоя зафиксирована при силе тока 120 А и составляет 1575 HV. Глубина упрочненного слоя повысилась с увеличением силы тока, однако значение твердости и содержание бора уменьшались. Небольшой градиент твердости, наблюдаемый по глубине покрытия, а также постепенное снижение твердости благодаря наличию

переходной зоны считаются благоприятными для хорошей адгезии боридного слоя к поверхности основного материала.

Список литературы

1. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. – М.: Новое знание, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-94735-149-1.
2. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом / В.И. Шин, П.В. Москвин, М.С. Воробьев,

В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 2. – С. 69–75. – DOI: 10.31857/S0032816221020191.

3. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под ред. Н.Н. Ковалю, Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 298 с. – ISBN 978-5-89503-577-1.

4. Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С. Влияние механоактивации порошковой смеси на структуру и свойства бороалитированных малоуглеродистых сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 151–162. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-151-162.

5. Yan P.X., Su Y.C. Metal surface modification by B-C-nitriding in a two-temperature-stage process // Materials Chemistry and Physics. – 1995. – Vol. 39, iss. 4. – P. 304–308. – DOI: 10.1016/0254-0584(94)01444-L.

6. Structural and strength characterization of steels subjected to bonding thermochemical process / E. Meléndez, I. Campos, E. Rocha, M.A. Barrón // Materials Science and Engineering: A. – 1997. – Vol. 234–236. – P. 900–903. – DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00389-4.

7. Bindal C., Üçisik A.H. Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 122, iss. 2–3. – P. 208–213. – DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00294-7.

8. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: справочное пособие. – Минск: Беларусь, 1981. – 205 с.

9. Lin L., Han K. Optimization of surface properties by flame spray coating and boriding // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 106, iss. 2–3. – P. 100–105. – DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00501-5.

10. Kim H.-J., Grossi S., Kweon Y.-G. Wear performance of metamorphic alloy coatings // Wear. – 1999. – Vol. 232, iss. 1. – P. 51–60. – DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00160-X.

11. Eroglu M. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203, iss. 16. – P. 2229–2235. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.010.

12. Bourithis L., Papadimitriou G. Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57, iss. 12. – P. 1835–1839. – DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01077-7.

13. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. – Vol. 11. – P. 45–46.

14. Characteristics and abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide / A.E. Balanovskiy, Nguyen Van Trieu, Nguyen Van Vinh, N.A. Astafieva // Tribology in Industry. – 2022. – Vol. 44 (3). – P. 518–527. – DOI: 10.24874/ti.1274.03.22.06.

15. Kulka M., Pertek A. Microstructure and properties of borocarbured 15CrNi6 steel after laser surface modification // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 236, iss. 1–4. – P. 98–105. – DOI: 10.1016/j.apusc.2004.04.005.

16. Glozman A., Bamberger M. Phase transitions and microstructure of a laser-induced steel surface alloying // Metallurgical and materials transactions. A. – 1997. – Vol. 28. – P. 1699–1703. – DOI: 10.1007/s11661-997-0261-9.

17. Laser surface modification of low carbon borided steels / P. Gopalakrishnan, P. Shankar, R.V. Subba Rao, M. Sundar, S.S. Ramakrishnan // Scripta Materialia. – 2001. – Vol. 44, iss. 5. – P. 707–712. – DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00674-6.

18. Tayal M., Mukherjee K. Localized boriding of low-carbon steel using a Nd:YAG laser // Journal of Materials Science. – 1994. – Vol. 29, iss. 21. – P. 5699–5702. – DOI: 10.1007/BF00349967.

19. Surface modification of mild steel with Boron Carbide reinforcement by electron beam melting / M. Iqbal, I. Shaukat, A. Mahmood, K. Abbas, M.A. Haq // Vacuum. – 2010. – Vol. 85, iss. 1. – P. 45–47. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2010.03.009.

20. Bourithis L., Papaefthymiou S., Papadimitriou G.D. Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties // Applied Surface Science. – 2002. – Vol. 200. – P. 203–218. – DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00901-7.

Конфликт интересов

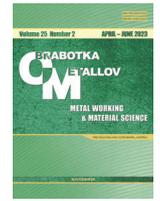
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Structure and properties of low carbon steel after plasma-jet hard-facing of boron-containing coating

Andrey Balanovsky ^a, Van Vinh Nguyen ^{2, b, *}, Natalia Astafieva ^c, Ruslan Gusev ^d

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>, fuco.64@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6514-9015>, nguyenvanh190596@gmail.com
^c <https://orcid.org/0000-0003-4957-9597>, anstella@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-4217-1329>, deltadota_99@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 02 March 2023

Revised: 24 March 2023

Accepted: 12 April 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Plasma cladding

Amorphous boron

Iron borides

Coating

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. One of the effective thermochemical methods for increasing the hardness of steel is boronizing by diffusion of boron atoms into the steel surface at high temperatures. As a result of boronizing, coatings are formed on the steel surface, consisting of columnar crystals of FeB and Fe_2B . The volume fraction of phases and the thickness of the coatings depend on the heating temperature and the chemical composition of the base material and the saturating medium. The main disadvantage of these boronized layers is its high brittleness. Boronizing by plasma heating is one of the alternatives to the diffusion boronizing process to minimize the brittleness of the boronized layer. **The purpose of the work:** to form boride coatings on low-carbon steel using plasma-jet hard-facing. **The research methods** are: determination of the content of chemical elements using an electron probe micro-analyzer, metallographic studies, analysis of the phase composition of the boronized layer, as well as measurement of the microhardness of the coating after plasma-jet hard-facing. **In this work** boronized layers obtained on low-carbon steel 20 by plasma-jet hard-facing of a boron-containing coating are studied. Powdered amorphous boron was used as an alloying element. The parameter varied during plasma-jet hard-facing process is the current strength (120 A, 140 A and 160 A). **Results and discussions.** Based on the studies performed, it is found that it is possible to form boronized layers on the steel surface using plasma-jet hard-facing method. It is noted that the surface layer of the coating of the 1st and 2nd specimens after plasma-jet hard-facing has a heterogeneous structure, consisting of rows of different zones. The first zone has a hypereutectic structure, which consists of primary borides FeB and Fe_2B , located in the eutectic, consisting of Fe_2B and $\alpha-Fe$. The second zone above the boundary with the base metal is represented by eutectic colonies composed of Fe_2B and $\alpha-Fe$. The third specimen is characterized by a hypoeutectic structure consisting of boride eutectic and primary dendrites of the α -solid solution of boron in iron. The maximum hardness is fixed on the surface of the first specimen and is 1,575 HV. The depth of the hardened layer increases with increasing current, but the hardness value and boron content decrease after treatment. The slight hardness gradient observed over the depth of the coating, as well as the gradual decrease in hardness due to the presence of the transition zone, are considered favorable for good adhesion of the boronized layer to the surface of the base material.

For citation: Balanovsky A.E., Nguyen V.V., Astafieva N.A., Gusev R.Yu. Structure and properties of low carbon steel after plasma-jet hard-facing of boron-containing coating. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 93–103. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103. (In Russian).

References

1. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and technology of chemical and heat treatment]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-94735-149-1.
2. Shin V.I., Moskvina P.V., Vorobyev M.S., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Yu., Koval' N.N. Povyshenie elektricheskoi prochnosti uskoryayushchego zazora v istochnike elektronov s plazmennym katodom [Increasing the electrical strength of the accelerating gap in an electron source with a plasma cathode]. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and Experimental Techniques*, 2021, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.31857/S0032816221020191.

* Corresponding author

Nguyen Van Vinh, Post-graduate Student

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontova st.,

664074, Irkutsk, Russian Federation

Tel.: 89050160252, e-mail: nguyenvanh190596@gmail.com



3. Koval' N.N., Ivanov Yu.F., eds. *Evolutsiya struktury poverkhnostnogo sloya stali, podvergnutoi elektronno-plazmennym metodam obrabotki* [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-plasma processing methods]. Tomsk, NTL Publ., 2016. 298 p. ISBN 978-5-89503-577-1.
4. Gulyashinov P.A., Mishigdorzhiiyn U.L., Ulakhanov N.S. Vliyanie mekhanoaktivatsii poroshkovoi smesi na strukturu i svoistva boroalitirovannykh malouglerodistykh stalei [Effect of mechanical activation of the powder mixture on the structure and properties of boro-aluminized low-carbon steels]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 151–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-151-162.
5. Yan P.X., Su Y.C. Metal surface modification by B-C-nitriding in a two-temperature-stage process. *Materials Chemistry and Physics*, 1995, vol. 39, iss. 4, pp. 304–308. DOI: 10.1016/0254-0584(94)01444-L.
6. Meléndez E., Campos I., Rocha E., Barrón M.A. Structural and strength characterization of steels subjected to bonding thermochemical process. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, vol. 234–236, pp. 900–903. DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00389-4.
7. Bindal C., Üçisik A.H. Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 122, iss. 2–3, pp. 208–213. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00294-7.
8. Voroshnin L.G. *Borirovanie promyshlennykh stalei i chugunov* [Borating of industrial steels and cast irons]. Minsk, Belarus' Publ., 1981. 205 p.
9. Lin L., Han K. Optimization of surface properties by flame spray coating and boriding. *Surface and Coatings Technology*, 1998, vol. 106, iss. 2–3, pp. 100–105. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00501-5.
10. Kim H.-J., Grossi S., Kweon Y.-G. Wear performance of metamorphic alloy coatings. *Wear*, 1999, vol. 232, iss. 1, pp. 51–60. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00160-X.
11. Eroglu M. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, iss. 16, pp. 2229–2235. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.010.
12. Bourithis L., Papadimitriou G. Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, iss. 12, pp. 1835–1839. DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01077-7.
13. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, vol. 11, pp. 45–46.
14. Balanovskiy A.E., Nguyen Van Trieu, Nguyen Van Vinh, Astafieva N.A. Characteristics and abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide. *Tribology in Industry*, 2022, vol. 44 (3), pp. 518–527. DOI: 10.24874/ti.1274.03.22.06.
15. Kulka M., Pertek A. Microstructure and properties of borocarbured 15CrNi6 steel after laser surface modification. *Applied Surface Science*, 2004, vol. 236, iss. 1–4, pp. 98–105. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.04.005.
16. Glozman A., Bamberger M. Phase transitions and microstructure of a laser-induced steel surface alloying. *Metallurgical and materials transactions. A*, 1997, vol. 28, pp. 1699–1703. DOI: 10.1007/s11661-997-0261-9.
17. Gopalakrishnan P., Shankar P., Subba Rao R.V., Sundar M., Ramakrishnan S.S. Laser surface modification of low carbon borided steels. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 44, iss. 5, pp. 707–712. DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00674-6.
18. Tayal M., Mukherjee K. Localized boriding of low-carbon steel using a Nd:YAG laser. *Journal of Materials Science*, 1994, vol. 29, iss. 21, pp. 5699–5702. DOI: 10.1007/BF00349967.
19. Iqbal M., Shaukat I., Mahmood A., Abbas K., Haq M.A. Surface modification of mild steel with Boron Carbide reinforcement by electron beam melting. *Vacuum*, 2010, vol. 85, iss. 1, pp. 45–47. DOI: 10.1016/j.vacuum.2010.03.009.
20. Bourithis L., Papaefthymiou S., Papadimitriou G.D. Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Applied Surface Science*, 2002, vol. 200, pp. 203–218. DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00901-7.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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


Оценка энергии формирования вакансий в ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлах с использованием теории функционала плотности

Юлия Эмурлаева^{1, a, *}, Дарья Лазуренко^{1, b}, Зинаида Батаева^{2, c}, Иван Петров^{3, d},
 Глеб Довженко^{4, e}, Любовь Макагон^{2, f}, Максим Хомяков^{5, g}, Кемал Эмурлаев^{1, h}, Иван Батаев^{1, i}

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

² Сибирский государственный университет водного транспорта, ул. Щетинкина, 33, г. Новосибирск, 630099, Россия

³ Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁴ ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, Кольцово, 630559, Россия

⁵ Институт лазерной физики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 15Б, Новосибирск, 630090, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-4835-4134>, emurlaeva@corp.nstu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2866-5237>, pavlyukova_87@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-5027-6193>, bataevazb@ngs.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-7968-1130>, ivan77766600@outlook.com,

^e <https://orcid.org/0000-0003-0615-0643>, g.dovjenko@skif.ru, ^f <https://orcid.org/0009-0006-1463-0697>, ledimakagon@mail.ru,

^g <https://orcid.org/0000-0001-8095-2092>, [mnkhomy@gmail.com](mailto:mnkhomiy@gmail.com), ^h <https://orcid.org/0000-0002-1114-6799>, emurlaev@corp.nstu.ru,

ⁱ <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>, i.bataev@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 548.4

История статьи:

Поступила: 10 апреля 2023

Рецензирование: 18 апреля 2023

Принята к печати: 27 апреля 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

Металлы

Энергия образования вакансий

Диффузия

Моделирование

Теория функционала плотности

Финансирование

Работа выполнена в соответствии с федеральным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FSUN-2020-0014 (2019-0931)): «Исследования метастабильных структур, формируемых на поверхностях и границах раздела материалов при экстремальном внешнем воздействии».

Благодарности

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

АННОТАЦИЯ

Введение. К числу дефектов кристаллической структуры, оказывающих существенное влияние на процессы структурных преобразований при термической, химико-термической и термопластической обработке и других видах обработки металлических сплавов, относятся вакансии. Энергия формирования вакансий является одним из важнейших параметров, используемых для описания диффузионных процессов. Эффективный подход к определению этой величины основан на применении теории функционала плотности (ТФП), важнейшим достоинством которой является проведение расчетов без использования каких-либо параметров, определяемых эмпирическим путем. **Цель работы:** оценка методом ТФП энергии формирования вакансий в широко распространенных в машиностроении ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлах и сравнение результатов, полученных с использованием различных типов обменно-корреляционных функционалов (GGA и meta-GGA). **Теория выполнения расчетов.** Расчеты проводились на основании метода проекционных соединительных волн с использованием программного кода GPAW и среды атомного моделирования ASE. В качестве обменно-корреляционных функционалов использовались функционалы MGGAC, rMGGAC и функционал Пердю – Берка – Эрнзергофа. В процессе моделирования волновые функции описывались плоскими волнами. Энергия формирования дефекта оценивалась в сверхъячейках размером 3×3×3. Расчеты проводились для ОЦК-металлов (Li, Na, K, V, Cr, Fe, Rb, Nb, Mo, Cs, Ta, W), ГЦК-металлов (Al, Ni, Cu, Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au, Pb, Co) и ГПУ-металлов (Be, Ti, Zr, Mg, Sc, Zn, Y, Ru, Cd, Hf, Os, Co, Re). **Результаты и обсуждение.** Сравнение расчетных значений энергии формирования вакансий свидетельствует о справедливости следующего соотношения величин: $E_f^{PBE} < E_f^{MGGAC} \leq E_f^{rMGGAC}$. Для значений, полученных с использованием свободно распространяемого кода GPAW, характерны те же закономерности, что и при использовании широко распространенного коммерческого программного пакета VASP. Применение функционалов PBE и MGGAC в большинстве случаев приводит к меньшей ошибке относительно экспериментальных значений по сравнению с функционалом rMGGAC.

Для цитирования: Оценка энергии формирования вакансий в ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлах с использованием теории функционала плотности / Ю.Ю. Эмурлаева, Д.В. Лазуренко, З.Б. Батаева, И.Ю. Петров, Г.Д. Довженко, Л.Д. Макагон, М.Н. Хомяков, К.И. Эмурлаев, И.А. Батаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 104–116. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-104-116.

*Адрес для переписки

Эмурлаева Юлия Юрьевна, ассистент

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

 Тел.: 8 (383) 346-06-12, e-mail: emurlaeva@corp.nstu.ru

Введение

Точечные дефекты, в особенности вакансии, в значительной степени определяют характер многих явлений, имеющих место в металлах и сплавах. Присутствие вакансий является важнейшим фактором, который учитывают при качественном и количественном описании диффузионных процессов, сопутствующих термической и химико-термической обработке металлов. Так, например, рекристаллизация, развивающаяся в пластически деформированных материалах, основана на явлении самодиффузии, которое, в свою очередь, тесно связано с особенностями миграции вакансий [1, 2]. Процесс полигонизации в деформированных металлах тесно связан с переползанием краевых дислокаций – явлением, в процессе которого происходит испускание или поглощение вакансий [1, 2]. Вакансии оказывают существенное влияние на кинетику диффузионных фазовых превращений. Объединение множества вакансий считают одной из основных причин формирования так называемой пористости Киркендалла, наблюдаемой при диффузионной сварке некоторых сплавов [3–6]. Межузельные дефекты и вакансии также играют большую роль в процессе радиационного набухания, которое является одной из главных проблем в ядерной энергетике.

Важнейшим параметром, используемым для описания вакансий, является энергия их формирования. На сегодняшний день существует ряд экспериментальных методов, позволяющих проводить оценку энергии формирования вакансий. К ним относятся, в частности, методы, основанные на прецизионном измерении теплоемкости, анализе электросопротивления, а также дилатометрии и позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС, англ. *positron annihilation spectroscopy*, PAS) [7–9]. Следует отметить, что определение энергии формирования точечных дефектов опытным путем является чрезвычайно трудоемким процессом и характеризуется недостаточно высокой точностью.

Результатом интенсивного развития методов вычислительного материаловедения в приложении к анализу дефектов кристаллического строения является разработка эффективных расчетных методов, среди которых особо следует выделить метод функционала плотности. Тео-

рия функционала плотности (ТФП, англ. *density functional theory*, DFT) позволяет относительно просто определять энергию основного состояния для любого вещества [10] и не требует использования в расчетах каких-либо параметров, определяемых эмпирическим путем. Таким образом, энергия формирования точечного дефекта может быть оценена как разница значений энергии сверхъядерки, содержащей вакансию, и бездефектной сверхъядерки. Для сопоставления с экспериментально определенными параметрами полученное методом ТФП значение требует ряда дополнительных корректировок. Детали такого подхода подробно описаны в обзорных публикациях [11, 12].

Один из этапов ТФП-расчетов связан с выбором обменно-корреляционного функционала. Точная форма этого функционала в настоящее время неизвестна [13], по этой причине на практике используют его приближенные формы. Следует отметить, что, даже если выбранное приближение дает корректный результат при оценке некоторого физического свойства, оно может не подходить для оценки других физических свойств. Среди множества возможных моделей обменно-корреляционного функционала широко используются две: приближение локальной плотности (англ. *local density approximation*, LDA), которое основано на модели свободных электронов [13, 14], и обобщенное градиентное приближение (англ. *generalized gradient approximation*, GGA), учитывающее не только электронную плотность, но также и ее градиент в рассматриваемой точке пространства [15]. Как LDA-, так и GGA-модели основаны на ряде упрощений и по этой причине характеризуются определенной неточностью. Выбор того или иного корреляционно-обменного функционала зависит от типа решаемой задачи. Так, например, использование GGA-модели позволяет более точно оценивать когезионную энергию [16]. Следовательно, эта модель может эффективно применяться для расчета энергии формирования точечных дефектов, в том числе вакансий. Однако на практике погрешность расчета энергии формирования вакансий с использованием GGA-функционалов оказалась довольно высокой [17]. В обзорной работе К. Фрейзольдта с соавторами [11] отмечается, что по сравнению с GGA-функционалом LDA-функционал обеспечивает более высокую

точность оценки значений энергии формирования вакансий, обусловленную оценкой вклада энергии внутренней поверхности, которая возникает при удалении одного из атомов.

Разработка новых функционалов и применение их для расчета различных характеристик материалов, в том числе для оценки энергии образования вакансий, позволяет минимизировать отклонение расчетных данных от экспериментальных. В частности, в работе [18] сообщается о потенциальной эффективности meta-GGA-функционалов. Meta-GGA-функционалы содержат вторую производную от электронной плотности, а также учитывают плотность кинетической энергии электронов, следовательно, они могут быть более точными. Однако расчеты энергии формирования вакансий с использованием revTPSS – одного из наиболее часто применяемых meta-GGA функционалов – эту гипотезу не подтвердили [8]. Таким образом, поиск функционалов, позволяющих повысить точность расчета энергии формирования вакансий в металлических сплавах, остается актуальной задачей.

Целью настоящей работы являлась оценка методом ТФП энергии формирования вакансий в широко распространенных в машиностроении ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлах и сравнение результатов, полученных с использованием различных типов обменно-корреляционных функционалов (GGA и meta-GGA). Результаты работы имеют значение для анализа эффективности метода ТФП при определении энергии формирования точечных дефектов. Кроме того, полученные данные могут быть использованы в справочных целях при моделировании диффузионных процессов.

Теория выполнения расчетов

Расчеты проводились на основании метода проекционных соединительных волн с использованием программного кода GPAW [19, 20] и среды атомного моделирования ASE [21], реализованных на языке программирования Python. В качестве обменно-корреляционных функционалов применялись широко распространенный функционал Пердью – Берка – Эрнзергофа (англ. *Perdew-Burke-Ernzerhof*, PBE) [22], относящийся к семейству GGA, а также функционалы MGGAC [23] и rMGGAC [24]. Функционал

MGGAC, предложенный авторами работы [23], предназначен для вычислений в области квантовой химии и физики твердого тела. Разработчики этой модели объединили полученный обменный функционал meta-GGA с корреляционным функционалом в приближении GGA. Такое сочетание позволяет с высокой точностью определять структурные и энергетические свойства твердых тел. Функционал rMGGAC, предложенный С. Яном с соавторами [24], учитывает большое несоответствие корреляционной энергии MGGAC для атомов и ионов.

При выполнении моделирования волновые функции описывались плоскими волнами. Энергетический порог для волновых функций составлял 500 эВ. Общее количество точек в k -сетке, построенной по методу Монкхорста – Пака, было равно 27 ($3 \times 3 \times 3$ вдоль осей x , y и z) для выбранных функционалов (PBE, MGGAC и rMGGAC). Для улучшения сходимости по отношению к дискретизации зоны Бриллюэна применялось распределение Марцари – Вандербиля (холодное размывание) с параметром температурного уширения 0,2 эВ [25]. Энергия формирования дефекта оценивалась в сверхъячейках размером $3 \times 3 \times 3$. Подробная информация об использованных в расчетах параметрах приведена в приложении А.

Расчеты проводились для следующих металлов:

- 1) ОЦК-металлы: Li, Na, K, V, Cr, Fe, Rb, Nb, Mo, Cs, Ta, W;
- 2) ГЦК-металлы: Al, Ni, Cu, Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au, Pb, Co;
- 3) ГПУ-металлы: Be, Ti, Zr, Mg, Sc, Zn, Y, Ru, Cd, Hf, Os, Co, Re.

Для расчета энергии формирования точечного дефекта X с использованием метода ТФП может быть применена следующая формула [11]:

$$E^f[X^q] = E_{tot}[X^q] - E_{tot}[bulk] - \sum_i n_i \mu_i + qE_F + E_{corr}, \quad (1)$$

где $E^f[X^q]$ – энергия дефекта X , имеющего заряд q ; $E_{tot}[X^q]$ – полная энергия сверхъячейки, содержащей дефект; $E_{tot}[bulk]$ – полная энергия идеальной сверхъячейки; n_i – число атомов элемента i , которые были добавлены в сверхъячейку (в этом случае принимается $n_i > 0$) либо уда-

лены из сверхъядейки (в этом случае считается, что $n_i < 0$), чтобы сформировать дефект; μ_i – химический потенциал добавленных или удаленных атомов; E_F – энергия Ферми; E_{corr} – слагаемое, учитывающее конечное количество k -точек при расчете так называемых мелких примесей (термин, распространенный в физике полупроводниковых материалов).

В случае единичной вакансии в чистом металле $q = 0$; $E_{corr} = 0$; $i = 1$; $n_i = n = -1$. Таким образом, выражение (1) существенно упрощается и принимает вид

$$E^f[vac] = E_{tot}[vac] - E_{tot}[bulk] + \mu, \quad (2)$$

где μ – химический потенциал анализируемого металла (в ТФП-расчетах часто используется химический потенциал одноэлементного соединения [26]).

Другими словами, энергия формирования вакансии может быть найдена как разница энергий между сверхъядейкой, содержащей вакансию, и идеальной сверхъядейкой. Однако полная энергия представляет собой экстенсивную величину, т. е. энергия системы возрастает пропорционально количеству атомов, содержащихся в ней. Очевидно, что в сверхъядейке, содержащей вакансию, имеется на один атом меньше, чем в идеальной. Таким образом, ее энергия (без учета эффекта, который вносит вакансия) будет меньше по сравнению с энергией идеальной сверхъядейки. По этой причине, чтобы выделить лишь вклад, создаваемый вакансией, необходимо к получившейся разнице в соответствии с формулой (2) добавить химический потенциал удаленного атома. Следует отметить, что в полупроводниках и ионных кристаллах проблема определения энергии формирования точечного дефекта значительно сложнее, чем в металлах [11].

Результаты и их обсуждение

Известно, что энергия формирования вакансий во многих металлах хорошо описывается зависимостью

$$E_f \approx AkT_m, \quad (3)$$

где T_m – температура плавления (К), k – постоянная Больцмана, A – коэффициент пропорциональности, значение которого примерно равно

10 [27]. Й. Хаяшиучи с соавторами полагали, что такая зависимость между энергией формирования вакансии и температурой плавления обусловлена схожестью процессов движения атомов при образовании вакансии, а также при их движении на границе «расплав – твердое тело» в процессе плавления. Согласно предложенной ими теории $A \approx 9,7$.

На рис. 1 представлены результаты проведенных исследований в координатах $E_f - T_m$. Можно отметить, что тенденция роста энергии формирования вакансий с увеличением температуры нагрева материала хорошо прослеживается при анализе данных, полученных различными методами. Зафиксированные в работе тенденции имеют схожий характер с ТФП-расчетами, которые Б. Медасани с соавторами [8] провели в программе VASP. Отмеченный факт свидетельствует о целесообразности применения свободно распространяемого кода GPAW в качестве альтернативы широко используемому коммерческому программному обеспечению VASP. Обобщение результатов расчетов и результаты, полученные другими авторами (в том числе результаты экспериментальных исследований), представлены в приложении Б.

Величина коэффициента пропорциональности A , оцененная на основании результатов ПАС, составляет $\sim 12,1$, что несколько превышает значение 10, предложенное в работах [27–29]. При вычислении энергии вакансии с использованием функционалов PBE, MGGAC и rMGGAC значения A соответственно равны $\sim 11,6$, $\sim 13,9$ и $\sim 17,0$. Таким образом, результаты, полученные с использованием широко распространенного корреляционно-обменного функционала PBE, в среднем оказываются существенно ближе к экспериментальным данным.

Разброс результатов расчетов относительно экспериментальных данных можно оценить по величине среднеквадратичной ошибки (MSE). В настоящей работе этот параметр вычисляли в соответствии с формулой

$$MSE = \frac{\sum (E_f^{calc_i} - E_f^{exp_i})^2}{n}, \quad (4)$$

где $E_f^{calc_i}$ и $E_f^{exp_i}$ – расчетные и экспериментальные значения энергии формирования вакансий для i -го элемента соответственно. Следует

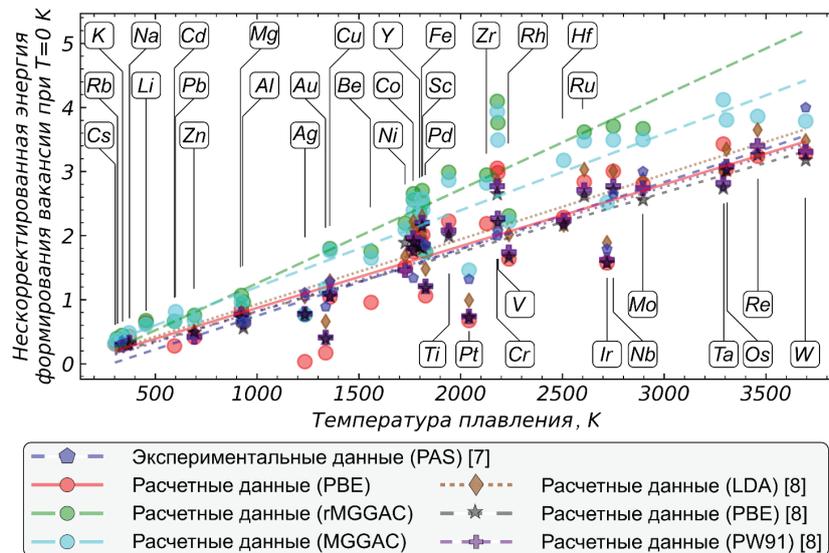


Рис. 1. Энергия формирования вакансий в различных металлах в зависимости от их температуры плавления

Fig. 1. Vacancy formation energy in various metals according to its melting point

отметить, что в настоящем исследовании использовались только экспериментальные значения энергии формирования вакансии, измеренные методом ПАС [7]. Экспериментальные данные в указанной работе представлены лишь для некоторых элементов, а для значительного количества расчетных данных отклонение от экспериментальных значений оставалось неизвестным и по этой причине при оценке величины MSE не учитывалось.

Значения MSE для функционалов PBE и MGGAC близки (0,66 и 0,64 эВ² соответственно). При использовании rMGGAC величина среднеквадратичной ошибки существенно больше (1,11 эВ²).

Рис. 2 позволяет сравнить рассчитанные в настоящей работе значения энергии формирования вакансий с экспериментальными результатами. Сравнение проведено на основе подхода, примененного Б. Медасани с соавторами в работе [8]. Из представленных данных следует, что применение функционалов rMGGAC и MGGAC приводит к некоторому завышению расчетных данных относительно экспериментальных. Значения энергии формирования вакансии, вычисленные с использованием широко распространенного функционала PBE, достаточно равномерно распределены относительно линии $y = x$. В общем случае для полученных результатов характерна тенденция следующего вида:

$E_f^{PBE} < E_f^{MGGAC} \leq E_f^{rMGGAC}$, что хорошо коррелирует с результатами работы Б. Медасани с соавторами [8].

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что закономерности, зафиксированные расчетным путем, соответствуют экспериментальным данным. В частности, выше отмечалась характерная зависимость энергии формирования вакансии от температуры плавления материала. Тем не менее энергию формирования вакансии, рассчитанную методом ТФП, без введения дополнительных коррекций в последующих вычислениях использовать затруднительно. Например, равновесная концентрация вакансий и коэффициент диффузии экспоненциально зависят от энергии формирования вакансий, что делает эти параметры чрезвычайно чувствительными к ошибке в определении последней. В соответствии с работой [30] для получения адекватной оценки равновесной концентрации дефектов при комнатной температуре необходимо знать энергию формирования вакансии с точностью до 0,025 эВ. Из представленных данных следует, что без проведения дополнительных коррекций такая точность недостижима. Одним из подходов, используемых для апостериорной коррекции энергии формирования вакансии, является учет энергии образования свободной поверхности внутри кристалла, появление которой вызвано удалением одного из атомов [30].

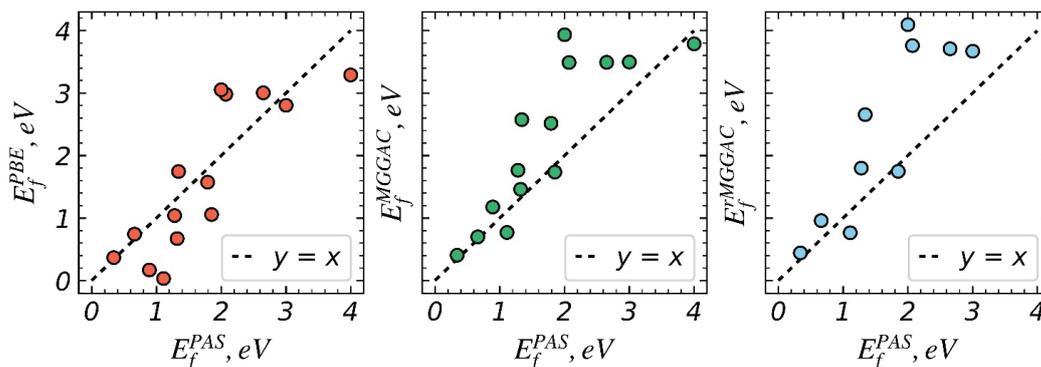


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений энергии формирования вакансии для обменно-корреляционных функционалов PBE (а), rMGGAC (б) и MGGAC (в). Пунктирная линия, представляющая $y = x$, изображена на графиках с целью удобства анализа полученных данных

Fig. 2. Comparison of experimental and computed values of the vacancy formation energy for the exchange-correlation functionals PBE (a), rMGGAC (b) and MGGAC (c). The dotted line representing the function $y = x$ is shown on the graphs for the convenience of analyzing the obtained data

Выводы

С использованием моделирования методом ТФП в работе проведен анализ энергии формирования вакансий в ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлах. На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Применение ТФП является эффективным подходом к проблеме оценки энергии формирования точечных дефектов. Для значений, полученных с использованием свободно распространяемого кода GPAW, характерны те же закономерности, что и при использовании широко распространенного коммерческого программного пакета VASP. В дальнейших работах целесообразно сравнить эффективность применения обоих пакетов с позиции обеспечения точности и скорости выполнения расчетов.

2. Использование функционалов PBE и MGGAC в большинстве случаев приводит к меньшей ошибке относительно экспериментальных значений по сравнению с функционалом rMGGAC.

3. Сравнение расчетных значений энергии формирования вакансий свидетельствует о справедливости следующего соотношения величин: $E_f^{PBE} < E_f^{MGGAC} \leq E_f^{rMGGAC}$.

4. Несмотря на наличие общих закономерностей, значения энергии формирования вакансий, получаемые расчетным путем, могут существенно отличаться от экспериментальных данных. Таким образом, рассчитанные для

$T = 0$ К значения энергии формирования вакансий можно использовать лишь в сравнительных исследованиях. Для повышения точности расчетные значения энергии формирования вакансий должны подвергаться дополнительной коррекции.

Список литературы

1. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – 3-е изд. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с. – ISBN 5-87623-103-7.
2. Humphreys F.J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. – 2nd ed. – Elsevier, 2004. – 605 p. – DOI: 10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2.
3. Siegel R.W. Vacancy concentrations in metals // Journal of Nuclear Materials. – 1978. – Vol. 69–70. – P. 117–146. – DOI: 10.1016/0022-3115(78)90240-4.
4. Mehrer H. Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes. – Springer, 2007. – 673 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-71488-0.
5. Smigelskas A.D., Kirkendall E.O. Zinc diffusion in alpha brass // Transactions of AIME. – 1947. – Vol. 171. – P. 130–142.
6. Thermodynamics, diffusion and the Kirkendall effect in solids / A. Paul, T. Laurila, V. Vuorinen, S. Divinski. – Springer, 2014. – 530 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-07461-0.
7. Kraftmakher Y. Equilibrium vacancies and thermophysical properties of metals // Physics Reports. – 1998. – Vol. 299, iss. 2–3. – P. 79–188. – DOI: 10.1016/S0370-1573(97)00082-3.

8. Vacancy formation energies in metals: A comparison of MetaGGA with LDA and GGA exchange–correlation functionals / B. Medasani, M. Haranczyk, A. Canning, M. Asta // *Computational Materials Science*. – 2015. – Vol. 101. – P. 96–107. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.01.018.
9. Temperature dependence of the Gibbs energy of vacancy formation of fcc Ni / Y. Gong, B. Grabowski, A. Glensk, F. Körmann, J. Neugebauer, R.C. Reed // *Physical Review B*. – 2018. – Vol. 97. – P. 214106. – DOI: 10.1103/physrevb.97.214106.
10. Stabilization of Ti_5Al_{11} at room temperature in ternary Ti–Al–Me (Me = Au, Pd, Mn, Pt) systems / D.V. Lazurenko, G.D. Dovzhenko, V.V. Lozanov, I.Y. Petrov, T.S. Ogneva, K.I. Emurlaev, I.A. Bataev // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 944. – P. 169244. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169244.
11. First-principles calculations for point defects in solids / C. Freysoldt, B. Grabowski, T. Hickel, J. Neugebauer, G. Kresse, A. Janotti, C.G. Van de Walle // *Reviews of Modern Physics*. – 2014. – Vol. 86, iss. 1. – P. 253–305. – DOI: 10.1103/revmodphys.86.253.
12. Calculating free energies of point defects from ab initio / X. Zhang, B. Grabowski, T. Hickel, J. Neugebauer // *Computational Materials Science*. – 2018. – Vol. 148. – P. 249–259. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2018.
13. *Giustino F.* Materials modelling using density functional theory: properties and predictions. – Oxford University Press, 2014. – 286 p.
14. *Kohn W., Sham L.J.* Self-consistent equations including exchange and correlation effects // *Physical Review*. – 1965. – Vol. 140, iss. 4A. – P. A1133–A1138. – DOI: 10.1103/PhysRev.140.A1133.
15. Atoms, molecules, solids, and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation / J.P. Perdew, J.A. Chevary, S.H. Vosko, K.A. Jackson, M.R. Pederson, D.J. Singh, C. Fiolhais // *Physical Review B*. – 1992. – Vol. 46, iss. 11. – P. 6671–6687. – DOI: 10.1103/PhysRevB.46.6671.
16. Application of generalized gradient approximations: The diamond– β -tin phase transition in Si and Ge / N. Moll, M. Bockstedte, M. Fuchs, E. Pehlke, M. Scheffler // *Physical Review B*. – 1995. – Vol. 52, iss. 4. – P. 2550–2556. – DOI: 10.1103/PhysRevB.52.2550.
17. Efficacy of surface error corrections to density functional theory calculations of vacancy formation energy in transition metals / P.K. Nandi, M.C. Valsakumar, Sh. Chandra, H.K. Sahu, C.S. Sundar // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2010. – Vol. 22. – P. 345501. – DOI: 10.1088/0953-8984/22/34/345501.
18. Density functional study of vacancies and surfaces in metals / L. Delczeg, E.K. Delczeg-Czirjak, B. Johansson, L. Vitos // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2011. – Vol. 23. – P. 045006. – DOI: 10.1088/0953-8984/23/4/045006.
19. *Mortensen J.J., Hansen L.B., Jacobsen K.W.* Real-space grid implementation of the projector augmented wave method // *Physical Review B*. – 2005. – Vol. 71, iss. 3. – P. 035109. – DOI: 10.1103/PhysRevB.71.035109.
20. Electronic structure calculations with GPAW: a real-space implementation of the projector augmented-wave method / J. Enkovaara, C. Rostgaard, J.J. Mortensen et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2010. – Vol. 22. – P. 243202. – DOI: 10.1088/0953-8984/22/25/253202.
21. The atomic simulation environment – A Python library for working with atoms / J. Enkovaara, C. Rostgaard, J.J. Mortensen et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2017. – Vol. 29, iss. 27. – P. 273002. – DOI: 10.1088/1361-648X/aa680e.
22. *Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M.* Generalized gradient approximation made simple // *Physical Review Letters*. – 1996. – Vol. 77, iss. 18. – P. 3865–3868. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.3865.
23. Relevance of the Pauli kinetic energy density for semilocal functionals / B. Patra, S. Jana, L.A. Constantin, P. Samal // *Physical Review B*. – 2019. – Vol. 100. – P. 155140. – DOI: 10.1103/PhysRevB.100.155140.
24. Improving the applicability of the Pauli kinetic energy density based semilocal functional for solids / S. Jana, S.K. Behera, S. Smiga, L.A. Constantin, P. Samal // *New Journal of Physics*. – 2021. – Vol. 23. – P. 063007. – DOI: 10.1088/1367-2630/abfd4d.
25. Thermal contraction and disordering of the Al(110) surface / N. Marzari, D. Vanderbilt, A. De Vita, M.C. Payne // *Physical Review Letters*. – 1999. – Vol. 82, iss. 16. – P. 3296–3299. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.3296.
26. *Emery A.A., Wolverton C.* High-throughput DFT calculations of formation energy, stability and oxygen vacancy formation energy of ABO_3 perovskites // *Scientific Data*. – 2017. – Vol. 4. – P. 170153. – DOI: 10.1038/sdata.2017.153.
27. *Hayashiuchi Y., Hagihara T., Okada T.* A new interpretation of proportionality between vacancy formation energy and melting point // *Physica B+C*. – 1982. – Vol. 115, iss. 1. – P. 67–71. – DOI: 10.1016/0378-4363(82)90056-0.
28. *Franklin A.D.* Statistical thermodynamics of point defects in crystals // *Point Defects in Solids*. – Boston, MA: Springer, 1972. – P. 1–101. – DOI: 10.1007/978-1-4684-2970-1_1.
29. *Doyama M., Koehler J.S.* The relation between the formation energy of a vacancy and the nearest neighbor interactions in pure metals and liquid metals // *Acta Metallurgica*. – 1976. – Vol. 24, iss. 9. – P. 871–879. – DOI: 10.1016/0001-6160(76)90055-9.
30. *Mattsson T.R., Mattsson A.E.* Calculating the vacancy formation energy in metals: Pt, Pd, and Mo // *Physical Review B*. – 2002. – Vol. 66. – P. 214110. – DOI: 10.1103/PhysRevB.66.214110.

Подробная информация о параметрах, использованных при проведении расчетов
Detailed information about the parameters used in the computations

Таблица 1

Table 1

Сведения о металлах, используемые при проведении расчетов методом ТФП
Details about metals used for DFT computations

Металл / Metal	Структура решетки / Lattice type	Пространственная группа симметрии / Space group	Параметры решетки, Å / Lattice parameters, Å		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Al	ГЦК / FCC	225	4,0509		
Ni			3,5240		
Cu			3,6149		
Rh			3,8000		
Pd			3,8889		
Ag			3,8889		
Ir			3,8390		
Pt			3,9230		
Au			4,0773		
Pb			4,9500		
Co			3,4200		
Li			ОЦК / BCC	229	3,5100
Na	4,2830				
K	5,3100				
V	3,0235				
Cr	2,8848				
Fe	2,8620				
Rb	5,6600				
Nb	3,3030				
Mo	3,1463				
Ta	3,3110				
W	3,1648				
Be	ГПУ / HCP	194			2,2860
Zr			3,2340	5,1480	
Mg			3,2092	5,2099	
Sc			3,3130	5,2760	
Zn			2,6575	4,9340	
Y			3,6435	5,7272	
Ru			2,7040	4,4000	
Cd			2,9790	5,6140	
Hf			3,1930	5,0520	
Os			2,7350	4,3200	
Ti			2,9400	4,6800	
Co			2,5071	4,0686	
Re	2,7600	4,4000			

**Параметры расчетов энергии сверхъячеек, находящихся в идеальном состоянии,
и сверхъячеек, содержащих единичную вакансию**

Parameters for calculating the energy of bulk and vacancy supercells

Функционал / Functional	Кристаллическая решетка / Lattice type	N	k	E_{PW}	MV	n	n_v
PBE	ГЦК / FCC	3×3×3	3×3×3	500	0,2	108	107
	ОЦК / BCC					54	53
	ГПУ / HCP					108	107
MGGAC	ГЦК					54	53
	ОЦК					108	107
	ГПУ					54	53
rMGGAC	ГЦК					108	107
	ОЦК					54	53
	ГПУ					108	107

Примечание. E_{PW} – отсечка кинетической энергии, определяющая количество плоских волн, эВ; MV – величина температурного уширения в распределении Марцари – Вандербильта, эВ; n и n_v – количество атомов в идеальной сверхъячейке и сверхъячейке с единичной вакансией. Для всех вычислений были заданы периодические граничные условия.

Note: E_{PW} – kinetic energy cutoff that determines the number of plane waves, eV; MV – the magnitude of the temperature broadening in the Marzari-Vanderbilt distribution, eV; n and n_v – the number of atoms in an ideal supercell and a supercell with a single vacancy. For all computations, periodic boundary conditions were set.

**Приложение Б
Appendix B**

**Значения энергий формирования вакансий в различных элементах
Values of vacancy formation energies in various elements**

**Значения энергии формирования вакансий (эВ), вычисленные в настоящей работе с использованием
корреляционно-обменных функционалов PBE, MGGAC, Meta-GGA, а также данные работ [8]
(расчетные значения) и [7] (результаты ПАС)**

**Values of vacancy formation energies (eV) calculated in this work using the correlation-exchange functionals
PBE, MGGAC, MetaGGA, along with the data from [8] (calculated values) and [7] (results of PAS)**

№	Металл / Metal	Кристаллическая решетка / Lattice	PBE	MGGAC	rMGGAC	LDA [8]	PBE [8]	PW91 [8]	PAS [7]
1	Be	ГПУ / HCP	0,96	1,65	1,75	–	–	–	–
2	Mg		0,85	0,96	1,07	0,8	0,77	0,72	–
3	Sc		2,01	2,4	2,51	1,97	1,86	1,8	–
4	Zn		0,41	0,68	0,76	0,5	0,42	0,49	–
5	Y		1,92	2,28	2,37	1,91	1,87	1,82	–
6	Ru		2,84	3,48	3,62	3,03	2,71	2,62	–
7	Cd		0,28	0,66	0,66	–	–	–	–
8	Hf		2,29	3,18	–	2,17	2,24	2,16	–
9	Os		3,04	3,8	–	3,35	3,08	3,02	–
10	Ti		2,23	2,87	2,99	2,08	2,08	1,99	–
11	Co		2,04	2,39	2,56	2,22	1,96	1,9	–
12	Re		3,24	3,86	–	3,65	3,4	3,26	–
13	Zr		2,19	2,82	2,95	–	–	–	–

Окончание табл. 3

End of the tab.3

№	Металл / Metal	Кристаллическая решетка / Lattice	PBE	MGGAC	rMGGAC	LDA [8]	PBE [8]	PW91 [8]	PAS [7]	
14	Li	ОЦК / BCC	0,64	0,61	0,67	–	–	–	–	
15	Na		0,43	0,48	–	0,34	0,33	0,31	–	
16	K		0,37	0,41	0,44	0,33	0,3	0,29	0,34	
17	V		2,98	3,49	3,76	–	2,27	2,2	2,07	
18	Cr		3,05	3,93	4,1	2,85	2,77	2,65	2,0	
19	Fe		1,86	2,58	2,71	2,3	2,2	2,14	–	
20	Rb		0,32	0,37	0,4	–	–	–	–	
21	Nb		3,0	3,49	3,71	3,01	2,77	2,71	2,65	
22	Mo		2,81	3,5	3,67	2,87	2,74	2,56	3,0	
23	Cs		0,31	0,32	–	–	–	–	–	
24	Ta		3,43	4,12	–	2,99	2,82	2,74	–	
25	W		3,29	3,79	–	3,48	3,31	3,18	4,0	
26	Al		ГЦК / FCC	0,74	0,7	0,96	0,71	0,65	0,56	0,66
27	Ni			1,51	2,09	2,19	1,68	1,46	1,89	–
28	Cu	1,04		1,77	1,8	1,29	1,09	1,05	1,28	
29	Rh	1,64		2,22	2,31	2,02	1,74	1,66	–	
30	Pd	1,06		1,74	1,75	1,48	1,21	1,18	1,85	
31	Ag	0,03		0,77	0,77	1,05	0,78	0,77	1,11	
32	Ir	1,57		2,52	–	1,89	1,62	1,57	1,79	
33	Pt	0,67		1,46	–	0,99	0,74	0,72	1,32	
34	Au	0,17		1,18	–	0,66	0,41	0,39	0,89	
35	Co	1,75		2,58	2,66	2,1	1,8	1,76	1,34	
36	Pb	–		0,81	–	–	–	–	–	

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Evaluation of vacancy formation energy for BCC-, FCC-, and HCP-metals using density functional theory

Yulia Emurlaeva^{1, a, *}, Daria Lazurenko^{1, b}, Zinaida Bataeva^{2, c}, Ivan Petrov^{3, d}, Gleb Dovzhenko^{4, e},
 Lubov Makogon^{2, f}, Maksim Khomyakov^{5, g}, Kemal Emurlaev^{1, h}, Ivan Bataev^{1, i}

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

² Siberian State University of water transport, 33 Schetinkina str., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogova str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

⁴ Siberian Circular Photon Source “SKIF” Borekov Institute of Catalysis of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SRF “SKIF”), 1 Nikol’skii pr., Kol’tsovo, 630559, Russian Federation

⁵ Institute of Laser Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 15B Prospekt Ak. Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-4835-4134>, emurlaeva@corp.nstu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2866-5237>, pavlyukova_87@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-5027-6193>, bataevazb@ngs.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-7968-1130>, ivan77766600@outlook.com,

^e <https://orcid.org/0000-0003-0615-0643>, g.dovzhenko@skif.ru, ^f <https://orcid.org/0009-0006-1463-0697>, ledimakagon@mail.ru,

^g <https://orcid.org/0000-0001-8095-2092>, [mnkhomy@gmail.com](mailto:mnkhomiy@gmail.com), ^h <https://orcid.org/0000-0002-1114-6799>, emurlaev@corp.nstu.ru,

ⁱ <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>, i.bataev@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 April 2023

Revised: 18 April 2023

Accepted: 27 April 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Metals

Vacancy formation energy

Diffusion

Simulation

Density functional theory

Funding

This study was funded by the Federal Task of Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FSUN-2020-0014 (2019-0931): “Investigations of Metastable Structures Formed on Material Surfaces and Interfaces under Extreme External Impacts”).

Acknowledgements:

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

ABSTRACT

Introduction. Vacancies are among the crystal lattice defects that have a significant effect on the structural transformations processes during thermal, chemical-thermal, thermomechanical, and other types of alloys treatment. The vacancy formation energy is one of the most important parameters used to describe diffusion processes. An effective approach to its definition is based on the use of the *density functional theory (DFT)*. The main advantage of this method is to carry out computations without any parameters defined empirically. **The purpose of the work** is to estimate vacancy formation energy of BCC-, FCC- and HCP-metals widely used in mechanical engineering and to compare these findings obtained using various exchange-correlation functionals (*GGA* and *meta-GGA*). **Computation procedure.** The computations were carried out using the projector-augmented wave method using the *GPW* code and the atomic simulation environment (*ASE*). The *Perdew-Burke-Ernzerhof*, *MGGAC* and *rMGGAC* functionals were used. The wave functions were described by plane waves within simulations. Vacancies formation energy was evaluated using supercells approach with a size $3 \times 3 \times 3$. Computations were carried out for BCC-metals (*Li, Na, K, V, Cr, Fe, Rb, Nb, Mo, Cs, Ta, W*), FCC-metals (*Al, Ni, Cu, Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au, Pb, Co*) and HCP-metals (*Be, Ti, Zr, Mg, Sc, Zn, Y, Ru, Cd, Hf, Os, Co, Re*). **Results and discussion.** A comparison of the defined vacancy formation energies indicates the validity of the following ratio of values: $E_f^{PBE} < E_f^{MGGAC} \leq E_f^{rMGGAC}$. The values

obtained using the open source *GPW* code are characterized by the same patterns as for widely spread commercially distributed program *VASP*. It was revealed that the use of the *PBE* and *MGGAC* functionals leads to a slight deviation relative to the experimentally determined vacancies formation energy in contrast to the computations using *rMGGAC*.

For citation: Emurlaeva Yu.Yu., Lazurenko D.V., Bataeva Z.B., Petrov I.Yu., Dovzhenko G.D., Makogon L.D., Khomyakov M.N., Emurlaev K.I., Bataev I.A. Evaluation of vacancy formation energy for BCC-, FCC-, and HCP-metals using density functional theory. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 104–116. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-104-116. (In Russian).

* Corresponding author

Emurlaeva Yu. Yu., Assistant

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: 8 (383) 346-06-12, e-mail: emurlaeva@corp.nstu.ru

References

1. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, MISiS Publ., 2005. 432 p. ISBN: 5-87623-103-7.
2. Humphreys F.J., Hatherly M. *Hatherly recrystallization and related annealing phenomena*. 2nd ed. Elsevier, 2004. 605 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2.
3. Siegel R.W. Vacancy concentrations in metals. *Journal of Nuclear Materials*, 1978, vol. 69–70, pp. 117–146. DOI: 10.1016/0022-3115(78)90240-4.
4. Mehrer H. *Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes*. Springer, 2007. 673 p. DOI: 10.1007/978-3-540-71488-0.
5. Smigelskas A.D., Kirkendall E.O. Zinc diffusion in alpha brass. *Transactions of AIME*, 1947, vol. 171, pp. 130–142.
6. Paul A., Laurila T., Vuorinen V., Divinski S. *Thermodynamics, diffusion and the Kirkendall effect in solids*. Springer, 2014. 530 p. DOI: 10.1007/978-3-319-07461-0.
7. Kraftmakher Y. Equilibrium vacancies and thermophysical properties of metals. *Physics Reports*, 1998, vol. 299, iss. 2–3, pp. 79–188. DOI: 10.1016/s0370-1573(97)00082-3.
8. Medasani B., Haranczyk M., Canning A., Asta M. Vacancy formation energies in metals: A comparison of MetaGGA with LDA and GGA exchange–correlation functionals. *Computational Materials Science*, 2015, vol. 101, pp. 96–107. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.01.018.
9. Gong Y., Grabowski B., Glensk A., Körmann F., Neugebauer J., Reed R.C. Temperature dependence of the Gibbs energy of vacancy formation of fcc Ni. *Physical Review B*, 2018, vol. 97, p. 214106. DOI: 10.1103/physrevb.97.214106.
10. Lazurenko D.V., Dovzhenko G.D., Lozanov V.V., Petrov I.Y., Ogneva T.S., Emurlaev K.I., Bataev I.A. Stabilization of Ti_5Al_{11} at room temperature in ternary Ti–Al–Me (Me = Au, Pd, Mn, Pt) systems. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 944, p. 169244. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169244.
11. Freysoldt C., Grabowski B., Hickel T., Neugebauer J., Kresse G., Janotti A., Van de Walle C.G. First-principles calculations for point defects in solids. *Reviews of Modern Physics*, 2014, vol. 86, iss. 1, pp. 253–305. DOI: 10.1103/revmodphys.86.253.
12. Zhang X., Grabowski B., Hickel T., Neugebauer J. Calculating free energies of point defects from ab initio. *Computational Materials Science*, 2018, vol. 148, pp. 249–259. DOI: 10.1016/j.commatsci.2018.
13. Giustino F. *Materials modelling using density functional theory: properties and predictions*. Oxford University Press, 2014. 286 p.
14. Kohn W., Sham L.J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*, 1965, vol. 140, iss. 4A, pp. A1133–A1138. DOI: 10.1103/PhysRev.140.A1133.
15. Perdew J.P., Chevary J.A., Vosko S.H., Jackson K.A., Pederson M., Singh D.J., Fiolhais C. Atoms, molecules, solids, and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation. *Physical Review B*, 1992, vol. 46, iss. 11, pp. 6671–6687. DOI: 10.1103/PhysRevB.46.6671.
16. Moll N., Bockstedte M., Fuchs M., Pehlke E., Scheffler M. Application of generalized gradient approximations: The diamond– β -tin phase transition in Si and Ge. *Physical Review B*, 1995, vol. 52, iss. 4, pp. 2550–2556. DOI: 10.1103/PhysRevB.52.2550.
17. Nandi P.K., Valsakumar M.C., Chandra Sh., Sahu H.K., Sundar C.S. Efficacy of surface error corrections to density functional theory calculations of vacancy formation energy in transition metals. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2010, vol. 22, p. 345501. DOI: 10.1088/0953-8984/22/34/345501.
18. Delczeg L., Delczeg-Czirjak E.K., Johansson B., Vitos L. Density functional study of vacancies and surfaces in metals. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23, p. 045006. DOI: 10.1088/0953-8984/23/4/045006.
19. Mortensen J.J., Hansen L.B., Jacobsen K.W. Real-space grid implementation of the projector augmented wave method. *Physical Review B*, 2005, vol. 71, iss. 3, p. 035109. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.035109.
20. Enkovaara J., Rostgaard C., Mortensen J.J., et al. Electronic structure calculations with GPAW: a real-space implementation of the projector augmented-wave method. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2010, vol. 22, p. 243202. DOI: 10.1088/0953-8984/22/25/253202.
21. Enkovaara J., Rostgaard C., Mortensen J.J., et al. The atomic simulation environment – A Python library for working with atoms. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2017, vol. 29, iss. 27, p. 273002. DOI: 10.1088/1361-648X/aa680e.
22. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 77, iss. 18, pp. 3865–3868. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.3865.

23. Patra B., Jana S., Constantin L.A., Samal P. Relevance of the Pauli kinetic energy density for semilocal functionals. *Physical Review B*, 2019, vol. 100, p. 155140. DOI: 10.1103/PhysRevB.100.155140.
24. Jana S., Behera S.K., Smiga S., Constantin L.A., Samal P. Improving the applicability of the Pauli kinetic energy density based semilocal functional for solids. *New Journal of Physics*, 2021, vol. 23, p. 063007. DOI: 10.1088/1367-2630/abfd4d.
25. Marzari N., Vanderbilt D., De Vita A., Payne M.C. Thermal contraction and disordering of the Al(110) surface. *Physical Review Letters*, 1999, vol. 82, iss. 16, pp. 3296–3299. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.3296.
26. Emery A.A., Wolverton C. High-throughput DFT calculations of formation energy, stability and oxygen vacancy formation energy of ABO_3 perovskites. *Scientific Data*, 2017, vol. 4, p. 170153. DOI: 10.1038/sdata.2017.153.
27. Hayashiuchi Y., Hagihara T., Okada T. A new interpretation of proportionality between vacancy formation energy and melting point. *Physica B+C*, 1982, vol. 115, iss. 1, pp. 67–71. DOI: 10.1016/0378-4363(82)90056-0.
28. Franklin A.D. Statistical thermodynamics of point defects in crystals. *Point Defects in Solids*. Boston, MA, Springer, 1972, p. 1–101. DOI: 10.1007/978-1-4684-2970-1_1.
29. Doyama M., Koehler J.S. The relation between the formation energy of a vacancy and the nearest neighbor interactions in pure metals and liquid metals. *Acta Metallurgica*, 1976, vol. 24, iss. 9, pp. 871–879. DOI: 10.1016/0001-6160(76)90055-9.
30. Mattsson T.R., Mattsson A.E. Calculating the vacancy formation energy in metals: Pt, Pd, and Mo. *Physical Review B*, 2002, vol. 66, p. 214110. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.214110.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

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

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Уважаемые *Авторы*, в связи с включением журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования *Web of Science* и *Scopus* изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (*Abstract*) и список использованной автором литературы (*References*), поскольку именно они, а не текст самой статьи, находят отражение в системах *Scopus* и *Web of Science*. По своему содержанию и информативности *Abstract* и *References* должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно в интересах автора тщательно подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

В журнале публикуются результаты **оригинальных** фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. **Опубликованные ранее научные работы не принимаются к рассмотрению и изданию!** Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» зарегистрирован по следующим научным специальностям: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; Технология машиностроения; Сварка, родственные процессы и технологии; Машины, агрегаты и процессы (по отраслям); Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; Порошковая металлургия и композиционные материалы; Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям); Металловедение (по отраслям). **Изданию имеет право опубликовать научные работы в рамках указанных специальностей! Публикация статей бесплатная!**

В связи с тем, что журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» принимает оригинальные научные статьи в формате *Full Article* – стандартный формат для завершенных научных исследований, объем основного текста работы должен составлять не менее 18–20 страниц машинописного текста через 1,5 интервала (учитывается тело статьи без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 стр. **Научная статья должна иметь структуру *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results And Discussion*):** • Введение (*Introduction*); • Методы / Методика исследований (*Methods*); • Результаты (*Results*); • Обсуждение (*Discussion*); • Заключение (*Conclusion*).

Как подать статью

Для того чтобы подать статью, автор (все соавторы) должен быть [зарегистрирован на сайте журнала](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/registration) http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/registration. Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Важно: работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику.

График выхода журнала в течение года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.

Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы **Антиплагиат**. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %.

Рукопись статьи готовится в соответствии с [правилами оформления](#) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Сканированные лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (**цветной режим сканирования, разрешение не менее 600 dpi**) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg.

По окончании всех работ обязательно **нажать кнопку «Отправить в редакцию»**.

Одновременно со статьей высылается оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается [авторский лицензионный договор](#).

Все рукописи рецензируются. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Правила оформления рукописи

«Правила оформления» (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules). Просим внимательно ознакомиться со всеми пунктами, представленными в данном разделе.

При оформлении своей работы рекомендуется воспользоваться шаблоном, представленным на сайте журнала: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Аффилиация авторов

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов). Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов **ОБЯЗАТЕЛЬНО** указываются его уникальный идентификационный код **ORCID** (Open Researcher and Contributor ID), РИНЦ AuthorID и электронная почта. Если отсутствует **ORCID**, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

После регистрации **ORCID** необходимо **ОТРЕДАКТИРОВАТЬ СВОИ ПЕРСОНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ В ДАННОМ ПРОФИЛЕ («пустой» профиль ORCID'а недопустим!)**. При подкачке статей предпочтение отдавайте англоязычным источникам. **Кроме того, рекомендуется: при регистрации профиля в ORCID'е использовать латинский алфавит, а не кириллицу!!!**; указывать полное имя, а не сокращенное. Не путайте местами Имя (First name) и Фамилию (Last name). Если обнаружались такие ошибки, – обязательно сделайте коррекцию своего профиля! После заполнения профиля необходимо обеспечить доступ к публичной информации.

Огромная просьба ко всем авторам – проверить и подкорректировать данные в своих профилях на платформах SCOPUS и WoS. Указать все свои цифровые идентификаторы (ЦИ) в профиле на сайте журнала. Внимание! При внесении соответствующего ЦИ, прежде чем сохранить введенные значения в профиле, необходимо посмотреть пример и кликнуть на рядом располагающуюся кнопку «Проверка профиля». Если введенные значения верны, то издательская система журнала откроет соответствующую страницу в интернете с вашими данными. Будьте внимательны, когда вводите РИНЦ AuthorID. Данный цифровой идентификатор нельзя путать с SPIN-кодом.

Внимание! РИНЦ AuthorID должен быть введен каждым автором в свой профиль на сайте журнала.

Научная статья должна иметь структуру **IMRAD** (**Introduction, Methods, Results And Discussion**):

- название (*Title*);
- аннотация (*Abstract*);
- введение (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements / Funding*);
- список литературы (*References*).

АННОТАЦИЯ к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (сле-

довать логике описания результатов в статье) (см. примеры в разделе «Правила оформления»). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: *обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.*

В аннотации Вы должны выдержать структуру **IMRAD** и **четко указать в тексте (как для русской, так и для английской версии)** соответствующие разделы: **Introduction** (введение); **Methods** (методы); **Results And Discussion** (результаты и обсуждения) (см. пример).

Объем аннотации (реферата) на русском языке должен быть 200...250 слов. Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!

Пример структурированной аннотации

• На русском языке

Введение. Сварка оказывает большое влияние на работоспособность создаваемых конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, вследствие снижения сопротивляемости зарождению и распространению трещин в зоне термического влияния и металла шва. Несмотря на существующее достаточно большое количество способов повышения надежности сварных соединений, некоторые из них сейчас полностью исчерпали свои возможности, а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому разработка необходимой специальной технологии сварки в условиях низких температур остается актуальной проблемой. **Цель работы:** изыскание путей повышения надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения при сварке в условиях низких температур. **В работе исследованы** сварные соединения стали 09Г2С, полученные сваркой на постоянном токе и в режиме импульсной низкочастотной модуляции тока в условиях положительных (+20 °С) и отрицательных (-45 °С) температур окружающего воздуха с применением трех новых марок сварочных электродов. **Методами исследования** являются механические испытания на статистическое растяжение и на ударный изгиб образцов сварных соединений, а также спектральный анализ химического состава и металлографические исследования металла шва. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что эксплуатационные показатели металлоконструкций зависят от выбора способа и температуры выполнения сварки, а также характеристик сварочного материала. Установлено, что для повышения значений ударной вязкости образцов, сваренных в условиях отрицательных температур методом адаптивной импульсно-дуговой сварки, требуется увеличение тепловложения, относительно погонной энергии, реализуемой в процессе сварки образцов при положительной температуре. Подтверждён эффект измельчения структуры металла шва при использовании адаптивной импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами, в том числе и в условиях отрицательной температуры окружающего воздуха (вплоть до -45 °С). Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на получение новых классов материалов и изделий из них, предназначенных для работы в условиях Севера и Арктики.

• На английском языке

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide practical application. Therefore, the development of the necessary special welding technology in low temperature conditions remains an urgent problem. **The purpose of the work:** to find the ways to improve the reliability of high-duty metal constructions welded at low temperatures. The welded joints of 09G2S steel obtained by welding with direct current and pulsed low-frequency current modulation under conditions of positive (+ 20 °C) and negative (-45 °C) ambient air temperatures **are investigated** using three new types of welding electrodes. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and impact bending of welded samples, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallurgical studies of weld metal are undertaken. **Results and Discussion.** It is revealed that the metal constructions operational factors depend on the choice of the welding method and welding temperature, as well as the characteristics of the welding material. It is established that to increase the impact strength of samples welded at negative temperatures by the adaptive pulse-arc welding method, an increase in heat input is required, relative to the rat of energy input, realized in the process of welding at positive temperature. The effect of the weld metal structure refinement using adaptive pulse-arc welding with coated electrodes is confirmed, including in conditions of negative ambient air temperature (down to 45 °C below zero). The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at obtaining new classes of materials and products, intended for operation in the conditions of the North and the Arctic.

ВВЕДЕНИЕ / Introduction

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа) (1,5–2 страницы). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная про-

блема, которая рассматривается в вашей статье. В связи с этим в данном разделе следует представить достаточно информированный (с равномерно распределенными ссылками на источники) литературный обзор по состоянию обозначенной проблемы. В конце раздела «Введение» формулируются **цель работы и обозначаются задачи**, решение которых позволит достичь поставленной цели. Не нужно в данном разделе говорить о конкретном результате, поскольку в структуре статьи есть соответствующий раздел.

МЕТОДЫ (МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ) / Methods

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по Госстандарту.

При проведении испытаний приводится следующая информация. 1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда. 2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т. д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ / Results And Discussion

Этот раздел содержит краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в изменяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно для того, чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшает работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Данный раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, показать перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ) / Conclusion

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

Качество графического материала!

По требованиям журнала графики и диаграммы желательнее готовить в векторных графических редакторах. Разрешение рисунков не ниже **600 dpi**. Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисовочная подпись (на **русском и на английском языке!**). Шрифты на рисунках должны быть увеличены и приведены к единообразию. Уважаемые авторы, журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является полноцветным печатным изданием. В вашей работе присутствуют рисунки, которые (для повышения наглядности) рекомендуется сделать цветными.

Название таблиц (как и внутреннее содержание) должно быть как на русском, так и на английском языках! (см. «**Правила оформления**»)

Математические формулы: сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны **только в редакторе формул Microsoft Equation 3.0!**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / References

Список цитируемой литературы включает источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации. Количество литературных ссылок должно быть **не менее 20** с большей (**более 50 %**) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать **15–17 %**. Если работа была издана и на русском и на английском (или других) языках, то в списке литературы и в *References* лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (**ГОСТ 7.0.5–2008**) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>) или (<https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bsi>).

Если статья имеет DOI – обязательно указать его! Если книга имеет ISBN – обязательно указать его!

Обратите внимание на правила оформления русскоязычных источников в **англоязычном блоке статьи** (в *References*).

Финансирование

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считаются авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Конфликт интересов

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «Авторы заявляют об отсутствии конфликта

интересов» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «The author declare no conflict of interest»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

Уважаемые Авторы, журнал «*Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)*» успешно прошел процедуру перерегистрации в РОСКОНАДЗОРе и начиная с 2021 г. перешел на выпуск научного издания на двух языках. Первое – печатное (основное) – на русском языке с англоязычной частью; второе – в электронном формате (pdf) – полностью вся работа на английском языке. **После получения сообщения о принятии статьи к опубликованию в журнале «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» авторам необходимо предоставить качественный перевод своей статьи на английский язык** (машинный перевод не допускается!). Форматирование англоязычной версии работы выполнять согласно шаблону. **Внимание!** Англоязычный вариант статьи необходимо прислать на почту журнала (metal_working@mail.ru) в течение двух недель после принятия работы к печати!

*Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»*

EDITORIAL MATERIALS

Dear Authors, in view of the inclusion of the journal “Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science” in the international databases of bibliographic description and scientific citation *Web of Science* and *Scopus*, the rules for formatting submitted manuscripts have been changed. The main goal of the changes is to make the main provisions and conclusions of the papers published in the journal accessible to a wide foreign audience that does not speak Russian. The English Abstract of the paper and the References used by the author(s) are now of particular importance, since References and not the text of the paper itself, are reflected in the *Scopus* and *Web of Science* systems. In terms of its content and informative value, the Abstract and References should draw the attention of foreign readers to the subject of the paper. Accordingly, it is in the interests of the author(s) to be scrupulous about the preparation of these blocks of the paper and ensure its highest possible quality.

The journal mainly publishes the results of **original** fundamental, applied and exploratory scientific research and post-graduate work. **Previously published scientific works are not accepted for consideration and publication!** Considerable attention is paid to the publication of review, problematic and discussion papers on topical issues of machine building and modern metallurgy and materials science. We are registered in the State commission for academic degrees and titles in the following scientific specialties: Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing; Engineering technology; Welding, related processes and technologies; Machines, units and processes (by industry); Metallurgy and heat treatment of metals and alloys; Powder metallurgy and composite materials; Nanotechnologies and nanomaterials (by industry); Materials science (by industry). **The journal has the right to publish scientific papers within the specified specialties! The publication of papers is free.**

Due to the fact that the journal “Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science” accepts original scientific papers in the *Full Paper* format – the standard format for completed scientific research, it is recommended to enlarge the main text of the work (the body of the paper is taken into account, without lists of references) – 18–20 typewritten pages, 1.5 spacing. In the case when the work is declared as an overview, the volume should be increased to 30 pages. **The scientific paper** should have the structure of **IMRAD** (**I**ntroduction, **M**ethods, **R**esults, **D**iscussion, **C**onclusion).

Paper submission

In order to submit a paper, the **author (all co-authors!)** should be [signed up for the journal website](#). The author (one of the co-authors) in his office selects the “Submit a paper” in the menu and enters all the necessary data. The author selects his/her co-authors from the list of registered users.

Important: The work should be received no later than 3 months before the official publication of the issue according to the schedule. In exceptional cases, in agreement with the editors of the journal, the deadline for submitting a paper to the next issue can be extended, but not more than two weeks.

Schedule of the journal publication during the year

<i>Issue</i>	<i>Publication (month, date)</i>
1	03/15
2	06/15
3	09/15
4	12/15

Before sending the manuscript to the editors, the authors are highly recommended to check their paper using the **Anti-plagiarism** system. The allowable percentage of text borrowing from other sources is 5–10 %.

The manuscript of the paper is prepared in accordance with the formatting rules in MS Word and is attached in *.doc, *.docx format.

The scanned license agreement with the signatures of the authors and the expert opinion (**color mode, resolution of at least 600 dpi**) should also be attached on the journal’s website in the “Submit Paper” section in *.pdf, *.jpg, *.jpeg formats.

At the end of all the work, be sure to click the “Send to the Editor” button.

Simultaneously with the article, the original expert opinion on the possibility of open publication of the article is sent to the postal address of the editorial office: 630073, Novosibirsk, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk State Technical University (NSTU), bldg. 5, com. 137VTs, the deputy editor-in-chief Vadim Y. Skeebea.

When a manuscript is accepted for publication, an [author's license agreement](#) is additionally sent to the postal address of the editorial office.

All manuscripts are reviewed. There is no fee for publishing manuscripts.

Paper submission guidelines:

See the section "Paper Submission guidelines" (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules). Please read carefully all the points presented in these sections.

When formatting your work, it is recommended to use the template presented on the journal's website: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Authors affiliation

A list of authors should contain Full names. Names and Surnames of the author(s) should be written out. The full name of the organization for each of the authors, indicating the street, house number, city, postal code and country also should be written. For each of the authors, it is MANDATORY to indicate its unique identification code ORCID (Open Researcher and Contributor ID), RSCI AuthorID and e-mail. If there is no ORCID, then it is necessary to follow the link <https://orcid.org/> and register in the system. After registration, you need to edit your personal data and the list of publications.

After registering ORCID, you need to EDIT YOUR PERSONAL DATA AND THE LIST OF PUBLICATIONS IN THIS PROFILE ("**an empty**" ORCID profile is not allowed!). When uploading papers, give preference to English-language sources. **It is also recommended: when registering a profile in ORCID, use the Latin alphabet, not Cyrillic!**; indicate the full name, not the abbreviation. Do not confuse First name and Last name. If such errors are found, be sure to correct your profile! After filling out the profile, it is necessary to provide access to public information.

A huge request to all authors is also to check and correct the data in their profiles on the SCOPUS and WoS platforms. Indicate all your digital identifiers (CI) in your profile on the journal's website. **Attention!** When entering the corresponding CI, before saving the entered values in the profile, you need to look at the example and click on the "Check Profile" button located next to it. If the entered values are correct, the publishing system of the journal will open the corresponding page on the Internet with your data. Be careful when entering the RSCI AuthorID. This digital identifier should not be confused with the SPIN code.

Attention – the RSCI AuthorID should be entered by each author in his/her profile on the journal's website!

The scientific paper should have the structure of IMRAD (Introduction, Methods, Results and Discussion):

- Title;
- Abstract;
- Introduction;
- Methods;
- Results;
- Discussion;
- Conclusion;
- Acknowledgements / Funding;
- References.

Abstract

Paper **abstract** should be: informative (do not contain general words); original; meaningful (reflect the main content of the paper and the research results); structured (follow the results description logic) (see examples in the section "Paper Submission guidelines"). The abstract should include the following aspects of the content of the paper: *the rationale; the subject; the purpose of the work; method or methodology of the work; results of work; the field of application of the results; conclusions.*

In the abstract, you should adhere to the structure of IMRAD and **clearly indicate in the text (for both Russian and English versions)** the corresponding sections: **Introduction; Methods; Results and Discussion** (*see an example*).

The volume of the abstract in English should be at least 250 words!

An example of a structured abstract:

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide practi-

cal application. Therefore, the development of the necessary special welding technology in low temperature conditions remains an urgent problem. **The purpose of the work:** to find the ways to improve the reliability of high-duty metal constructions welded at low temperatures. The welded joints of 09G2S steel obtained by welding with direct current and pulsed low-frequency current modulation under conditions of positive (+ 20 °C) and negative (-45 °C) ambient air temperatures **are investigated** using three new types of welding electrodes. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and impact bending of welded samples, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallurgical studies of weld metal are undertaken. **Results and Discussion.** It is revealed that the metal constructions operational factors depend on the choice of the welding method and welding temperature, as well as the characteristics of the welding material. It is established that to increase the impact strength of samples welded at negative temperatures by the adaptive pulse-arc welding method, an increase in heat input is required, relative to the rate of energy input, realized in the process of welding at positive temperature. The effect of the weld metal structure refinement using adaptive pulse-arc welding with coated electrodes is confirmed, including in conditions of negative ambient air temperature (down to 45 °C below zero). The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at obtaining new classes of materials and products, intended for operation in the conditions of the North and the Arctic.

Introduction

The “**Introduction**” section should be used to define the place of your work (approach, data or analysis) (**up to 1.5-2 pages**). It is understood that there is an unresolved or emerging scientific problem that is being addressed in your paper. In this regard, this section should provide a sufficiently informed (with evenly distributed references to sources) literature review on the state of the indicated problem. Most of the links should be given in this section! At the end of the “**Introduction**” section, **the purpose of the work** is formulated and the **tasks** are indicated, the solution of which will allow achieving the set goal. There is no need to write about a specific result in this section, since there is a corresponding section in the structure of the paper.

METHODS / METHODS OF RESEARCH

Theory (for theoretical works) or **Experimental technique** (for experimental works). One should avoid repetitions, unnecessary details and known provisions, detailed derivations of formulas and equations (give only the final formulas, explaining how it was obtained).

The rationale for the choice of this material (or materials) and methods for describing the material (materials) in this work are given.

If necessary, drawings of samples with units of measurement are given (units of measurement in SI system only). When testing reference materials, reference to the standard is sufficient. For a large test program, it is advisable to use a matrix-type table. If samples are taken from ingots, billets or components, then its orientation and location in the source material are described; standard designations according to the standard are used.

During the tests, the following information is provided: 1. Type and conditions of tests, for example, test temperature, loading rate, environment; 2. Describes the variable parameters, measured values and methods of its measurement with accuracy, degree of error, resolution, etc. ; for quantities that have been calculated, the methods used to calculate it.

RESULTS AND ITS DISCUSSION

A section contains a brief description of the experimental and/ or theoretical data obtained. The presentation of the results should consist in identifying the discovered patterns, and not in a mechanical retelling of the contents of tables and graphs. It is recommended to present the results in the past tense. The discussion should contain the interpretation of the research results obtained by **you** (correspondence of the results to the research hypothesis, generalization of the research results, proposals for practical application, proposals for the direction of future research).

The above recommendations are also relevant for theoretical and computational work. In papers based on computational work, you should specify the finite element type, boundary conditions and input parameters. The numerical result is presented taking into account the limitations (accuracy) in the applied computational methods.

In papers based on analytical work, when presenting a long series of formulas, it is necessary to provide an explanatory text so that the essence of the content of the work is clear. The correctness of the calculations should be confirmed by intermediate calculations. As in the case of experimental work, a simple description of numerical or analytical transformations without considering the theoretical (physical) root cause is usually not enough to justify the publication of such a paper. A simple report of numerical results in the form of tables or in the form of text, as well as endless data from experimental work, without trying to determine or hypothesize why such results were obtained, without trying to identify causal relationships, does not decorate the work.

Comparing your numerical results to the numerical results obtained by someone else can be informative. But it doesn't prove anything. Control by comparison with commonly known solutions and verification by comparison with experimental data are mandatory.

Discussion

Use this section to fully explain the significance of your approach, data or analysis and results. This section organizes and interprets the results. The purpose of this section is to show what knowledge has been gained as a result of your work and to show the perspective of the results obtained by comparing it with the current situation in this area described in the "Introduction" section. A large number of graphs and color illustrations do not give a scientific result. It is the responsibility of the author to organize the data and present the results systematically. Thus, simply reporting test results without attempting to investigate internal mechanisms is of little value.

CONCLUSION / CONCLUSIONS

This section usually begins with a few phrases summarizing the work done, and then the main conclusions are presented in the form of a list. Should be concise.

Graphics quality!

We remind you that according to the requirements of the journal, charts and diagrams should be prepared in vector graphic editors. The resolution of the figures is not less than 600 dpi.). Under each figure there should be a corresponding caption (**in Russian and in English!**). The fonts in the figures should be enlarged and brought to uniformity. Dear authors, the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" is a full-color printed edition. If your work contains drawings, it is recommended to make it in color (for clarity).

The tables' headings (as well as the internal content) should be both in Russian and English! (see "Paper Submission guidelines")

Mathematical formulas: complex and multi-line formulas should be typed **entirely in the formula editor Microsoft Equation 3.0!**

References

The list of cited literature includes sources containing materials that the author used when writing the paper, and is drawn up according to the samples below. The composition of literary sources should reflect the state of scientific research in different countries in the problem area under consideration. Links should be available to the scientific community, so the DOI of the publication is desirable. The number of references should be **at least 20** with **more than 50 %** of foreign sources. References in the text are given in square brackets, for example [1] or [2-5]. The numbering of sources should correspond to the order of references to it in the text. Links to extended abstract of dissertation and dissertations are allowed if its available electronic versions are available. References to textbooks, teaching aids, monographs should be of subordinate importance and should not exceed 10–15%, since it is not easily accessible to the general scientific community. Links to unpublished works are not allowed. Self-citation should not exceed **15–17 %**. If the work was published in both Russian and English (or other) languages, then it is better to give a link to the translated work in the References. In connection with the entry of the journal into the citation database of scientific publications, in addition to the traditional list of references (**GOST 7.0.5–2008**), an additional list is required with the translation of Russian-language sources into Roman type and English language. Transliteration is strictly according to the BSI system (see <http://ru.translit.net/?account=bsi>) or (<https://antropophob.ru/utility-i-prochie-melochi/16-transliteratsiya-bsi>).

If the paper has a DOI, be sure to indicate it! If the book has an ISBN, be sure to include it!

Pay attention to the guidelines for formatting Russian-language sources in the **English-language section of the paper (in References)**.

Dear Authors, the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science" has successfully passed the re-registration procedure with ROSCOMNADZOR and, starting from 2021, is switching to the publication of a scientific publication in two languages. The first – printed (basic) – in Russian with an English part; the second – Electronic Publications (pdf) – all the work is completely in English. **After receiving a message about the acceptance of the paper for publication in the journal "Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science", the authors should provide a high-quality translation of their paper into English** (machine translation is not allowed!). English version of the work should be formatted according to the template. **Attention!** The English version of the paper should be sent to the journal's mail (metal_working@mail.ru) within 2 weeks!

*Editorial board and editorial council of the journal
"Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science"*

МАТЕРИАЛЫ СОУЧРЕДИТЕЛЕЙ

Внимание, инженеры и технические специалисты, занимающиеся проектированием, эксплуатацией, наладкой электроавтоматики металлорежущих и металлообрабатывающих станков, а также студенты и аспиранты профильных специальностей вузов, соучредитель журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)» ООО Научно-производственная коммерческая фирма «МАШСЕРВИСПРИБОР» готова предоставить свои страницы под рубрику «Системы автоматизации металлорежущих и металлообрабатывающих станков».

В представляемых для данной рубрики статьях должны быть изложены проблемы и их решения в рамках следующих тем:

- системы ЧПУ;
- станочные электроприводы;
- датчики и элементы станочной электроавтоматики;
- модернизация систем автоматизации и электроприводов;
- импортозамещение;
- автоматизация разработки технологических программ для станков с ЧПУ.

Преимуществом публикации будут пользоваться статьи, где отражены разработка и производство отечественных систем и элементов электроавтоматики, а также темы, посвященные импортозамещению. Для авторов статей под указанной выше рубрикой публикация является бесплатной.

Важно! Работа должна поступить не позднее чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях по согласованию с редакцией журнала срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели. Перед отправкой рукописи в редакцию настоятельно рекомендуется авторам проверить свою статью с помощью системы Антиплагиат. Допустимый процент заимствования текста из других источников составляет 5–10 %. Объем материалов рубрики в одном выпуске журнала не должен превышать трех печатных страниц журнала (15 000 знаков без пробелов).

Материалы для публикации принимаются ООО Научно-производственной коммерческой фирмой «МАШСЕРВИСПРИБОР» (e-mail: mshp@chpu.ru). Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Вниманию авторов! Материалы, поступившие от лица ООО Научно-производственной коммерческой фирмы «МАШСЕРВИСПРИБОР», не индексируются в Национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ – метаданные статей не подаются в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU. Кроме того, метаданные указанных материалов соучредителя не отправляются в международные базы Web of Science и Scopus.

Для опубликования материалов в основных рубриках журнала «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология · оборудование · инструменты)», индексируемых в РИНЦ, Web of Science и Scopus, необходимо следовать правилам оформления и правилам подачи статей, представленных на сайте научного издания https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov .

Напоминаем, что в журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения и современной металлургии и материаловедения. В ВАК журнал «ОМ» зарегистрирован по следующим научным специальностям: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; Технология машиностроения; Сварка, родственные процессы и технологии; Машины, агрегаты и процессы (по отраслям); Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; Порошковая металлургия и композиционные материалы; Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям); Материаловедение (по отраслям). Издание имеет право опубликовать научные работы только в рамках указанных специальностей!

В связи с тем что журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» принимает оригинальные научные статьи в формате *Full Article*, стандартный формат для завершенных научных исследований, объем основного текста работы должен составлять не менее 18–20 страниц машинописного текста через 1,5 интервала) (учитывается тело статьи, без списков литературы). В случае, когда работа заявляется как обзорная, объем должен быть увеличен до 30 стр. **Научная статья должна иметь структуру *IMRAD* (*Introduction, Methods, Results And Discussion*):** • Введение (*Introduction*); • Методы / Методика исследований (*Methods*); • Результаты (*Results*); • Обсуждение (*Discussion*); • Заключение (*Conclusion*).

Порядок подачи статьи в редакцию представлен на странице: https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/how_to.

Для того чтобы подать статью, **автор (все соавторы)** должен быть зарегистрирован на сайте журнала. Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «Подать статью» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления (https://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules) в редакторе *MS Word* и прикрепляется в формате *.doc, *.docx. При оформлении своей работы рекомендуется воспользоваться шаблоном, представленным на сайте журнала: https://journals.nstu.ru/files/2_4/file/Shablon_oformleniya_OM_2020.docx.

Сканированный лицензионный договор с подписями авторов и экспертное заключение (цветной режим сканирования, разрешение не менее 600 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «Подать статью» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg.

По окончании всех работ обязательно нажать кнопку «Отправить в редакцию».

Одновременно со статьей высылается оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137ВЦ, зам. гл. редактора Скиба В.Ю.

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается **авторский лицензионный договор**.

Все рукописи рецензируются. Плата за публикацию рукописей не взимается.

Соучредители журнала
«ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (технология • оборудование • инструменты)»

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

О МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



WEB OF SCIENCE

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



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



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

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-80400 от 01 марта 2021 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 25 Number 2

APRIL – JUNE 2023

**ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОВ**

**METAL WORKING
& MATERIAL SCIENCE**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

NOVOSIBIRSK