

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

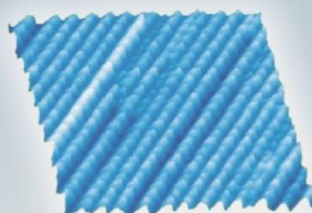
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2(164)
2025

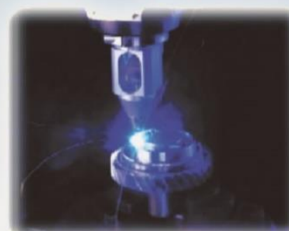
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



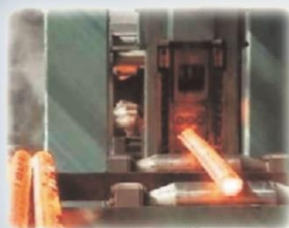
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



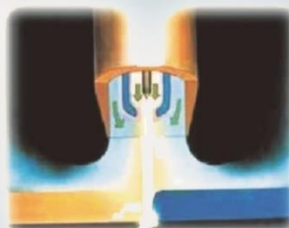
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



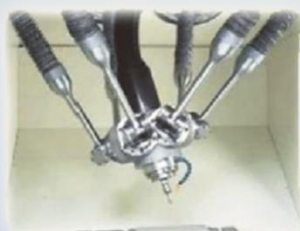
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 2 (164)

2025

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., акад. НАН Беларуси МЫШКИН Н.К.

(г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПЕТРОВА Л.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. ФЕДОНИН О.Н. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № **ФС77-75524**

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Фомин В.В., Малахов А.Ю., Петрова Л.Г. Металловедческие
исследования по выбору аналога зарубежной стали для
элемента подвески гоночного автомобиля 3

Куксенова Л.И., Архипов В.Е., Пугачев М.С., Козлов Д.А.
Структурно-фазовые превращения, массоперенос и триботехнические
характеристики газодинамических медно-цинковых покрытий при
трении скольжения. 11

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Черняев А.В., Чудин В.Н. Верхнеграницный расчет изотермической
осадки кольцевой заготовки 23

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Носенко В.А., Кузнецов С.П., Сердюков Н.Д., Харламов В.О. Перенос
продуктов износа абразивного материала при царапании
и шлифовании титана 30

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

**Янюшкин А.Р., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Скрипняк В.В.,
Скрипняк В.А.** Проблемы и решения обработки новых
композиционных материалов на основе диборида циркония
электроалмазными методами 40

*Журнал входит в перечень изданий ВАК, утвержденных для соискателей
ученых степеней по научным специальностям: 2.5.3 - Трение и износ в
машинах; 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки; 2.5.6 - Технология машиностроения; 2.5.7 -
Технология и машины обработки давлением; 2.5.8 - Сварка, родственные
процессы и технологии; 2.6.17 - Материаловедение (по отраслям)
(технические науки).*

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 2 (164)

2025

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.
(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., MYSHKIN N.K. Acad. of NAS Belarus
(Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIR INSKY Ju.L. (Volgograd)

d.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".
Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.
E-mail: editnrm@yandex.ru
<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)
26.04.2019 registration number
print publication № FS77-75524**

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Fomin V.V., Malakhov A.Yu., Petrova L.G. Metal science research aimed
at choosing a foreign steel analogue for a racing car suspension member 3

Kuksenova L.I., Arkhipov V.E., Pugachev M.S., Kozlov D.A. Structural and
phase transformations, mass transfer, and tribo-technical characteristics of
gas-dynamic copper-zinc coatings occurring under sliding friction 11

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF METAL PROCESSING BY PRESSURE

Chernyaev A.V., Chudin V.N. Upper boundary calculation of isothermal
yield of a ring blank. 23

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

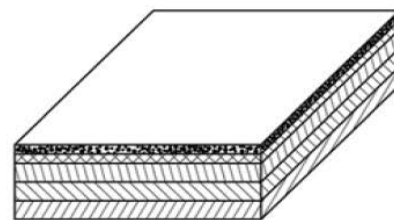
Nosenko V.A., Kuznetsov S.P., Serdyukov N.D., Kharlamov V.O. Abrasive
wear products transport during titanium scratching and abrasion 30

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Yanushkin A.R., Lobanov D.V., Yanushkin A.S., Skripnyak V.V.,
Skripnyak V.A.** Problems and solutions of composite machining
by electro-diamond methods for materials based on zirconium diboride 40

The journal is included in the list of publications of the HAC approved for applicants of
academic degrees in scientific specialties: 2.5.3 - Friction and wear in machines;
2.5.5 - Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing;
2.5.6 - Mechanical engineering technology; 2.5.7 - Technology and pressure treatment
machines; 2.5.8 - Welding, related processes and technologies; 2.6.17 - Materials
Science (by industry) (technical sciences).

**Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»**



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.3-10.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P.3-10.

Научная статья
УДК 629.371.21:620.22
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Металловедческие исследования по выбору аналога зарубежной стали для элемента подвески гоночного автомобиля

Владислав Вячеславович Фомин¹, аспирант
Александр Юрьевич Малахов², к.т.н.
Лариса Георгиевна Петрова³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ v.fomin63@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² malahov-alex@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

Аннотация. Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью решения проблемы импортозамещения материалов в автомобилестроении. В статье приведены результаты металловедческих исследований по выбору аналога зарубежной стали для изготовления детали подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток». Комплекс исследований включал химический и металлографический анализ, прочностные испытания на растяжение и измерение твердости. Для определения допустимых нагрузок, возникающих в элементах направляющего аппарата подвески, применен метод анализа напряжено-деформированного состояния нагруженного узла с построением 3D-модели. В качестве заменителя итальянской омологированной стали для изготовления элемента направляющего аппарата подвески определена наиболее близкая по химическому составу отечественная сталь 20Х. Различия в свойствах оригинальной стали и стали-заменителя связаны с особенностями их микроструктуры: более высокий уровень упрочнения оригинальной стали обусловлен меньшим размером зерна. Проведение термической обработки в виде закалки и высокого отпуска (улучшение) позволяет получить в стали 20Х прочность и твердость наиболее близкие к оригиналу, при более высокой пластичности.

Ключевые слова: конструкционная сталь, микроструктура, механические свойства, термическая обработка, гоночный автомобиль, Формула Восток, направляющий аппарат подвески

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FFSM-2024-0001.

Для цитирования: Фомин В.В., Малахов А.Ю., Петрова Л.Г. Металловедческие исследования по выбору аналога зарубежной стали для элемента подвески гоночного автомобиля // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Metal science research aimed at choosing a foreign steel analogue for a racing car suspension member

Vladislav V. Fomin¹, PhD student
Alexander Yu. Malakhov², PhD Eng.
Larisa G. Petrova³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ v.fomin63@yandex.ru

² malahov-alex@ya.ru

³ petrova_madi@mail.ru

Abstract. The relevance of the study is due to the need to solve the problem of import substitution of materials in the automotive industry. The article presents the results of metal research aimed at choosing a foreign steel analogue for the manufacture of suspension parts of a Formula Vostok racing car. The complex of studies included chemical and metallographic analysis, tensile strength tests and hardness measurements. To determine the permissible loads occurring in the suspension guide device members, the method of analyzing the stress-strain state of the loaded assembly with the construction of a 3D model is applied. As a substitute for Italian homologated steel for the manufacture of the suspension guide element, the 20X domestic steel was determined to be the closest in chemical composition. The differences in the properties of the original steel and the substitute steel are related to the peculiarities of their microstructure: high strengthening level of the original steel results from the smaller grain size. Heat treatment in the form of quenching and high tempering (improvement) makes it possible to obtain in 20X steel the strength and hardness closest to the original, with higher ductility.

Keywords: structural steel, microstructure, mechanical properties, heat treatment, racing car, Formula Vostok, steering unit

Acknowledgements: the material was prepared within a scientific research on the project No. FFSM-2024-0001.

For citation: Fomin V.V., Malakhov A.Yu., Petrova L.G. Metal science research aimed at choosing a foreign steel analogue for a racing car suspension member / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Введение

В настоящее время из-за ограничения поставок в нашу страну зарубежных деталей одной из ключевых становится задача импортозамещения материалов, и, в первую очередь, сталей. Решение проблемы изыскания заменителей зарубежных сталей является актуальным не только для Российской Федерации. В странах Азии, нацеленных на самостоятельное производство, активно занимаются разработкой правил применения национальных марок сталей, эквивалентных европейским стальным материалам. Например, в инструкции [1], составленной профессиональными сообществами Гонконга, Китая и Макао, приводятся стали, производимые США, Японией, Австралией/Новой Зеландией, Китаем и Россией, которые рекомендованы для использования в качестве аналогов европейским сталям. Установлены принципы эквивалентности стальных материалов, к которым относятся как соответствие характеристик материала, так и гарантии качества. Характеристиками сравнения являются прочность, пластичность, вязкость, а также химический состав и технологический показатель свариваемости.

Задача выбора эквивалентных отечественных аналогов для замены зарубежных сталей особенно насущна для автомобильной отрасли, и в частности, при конструировании гоночных автомобилей. Многие детали для них изготавливаются из так называемых омологированных сталей, удовлетворяющих

специальным техническим требованиям для данного класса автомобилей [2]. Это относится, в частности, к элементам системы подвески различной конструкции [3 – 7]. Отдельные трудности возникают при отсутствии доступа к спецификации на конкретный материал, что требует разработки и применения методики реверсивного инжиниринга.

В данной работе рассмотрен пример применения металловедческого комплекса исследований [8] для замещения стали для изготовления элемента направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток».

Гоночный автомобиль класса «Формула Восток» для национальных кольцевых гонок создан на базе автомобиля «Формула 3» в классе Европейского чемпионата. При конструировании направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля применяется прокат итальянской стали в форме труб овального (каплевидного) сечения. Использование стали от единственного поставщика вызывает очевидные трудности, что требует поиска отечественного аналога.

Целью настоящей работы является обоснование выбора конструкционной стали и ее термообработки для изготовления направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток» путем сравнительного исследования химического состава, микроструктуры и прочностных свойств оригинальной стали и потенциального заменителя.

Методика исследования и применяемое оборудование

Для определения допустимых нагрузок, возникающих в элементах направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток», применен метод анализа напряженно-деформированного состояния нагруженного узла с построением 3D-модели при помощи системы автоматизированного проектирования SolidWorks [9].

Подбор отечественного аналога для замены оригинальной стали основан на анализе признаков сравнения: структуры, химического состава и прочностных характеристик (по ГОСТ 4543-2016 [10]). Для анализа применен комплекс металловедческих исследований, разработанный для мониторинга структурного состояния конструкционных материалов, который успешно используется при анализе разрушений стальных деталей автомобилей [8, 11]. Данный комплекс включает:

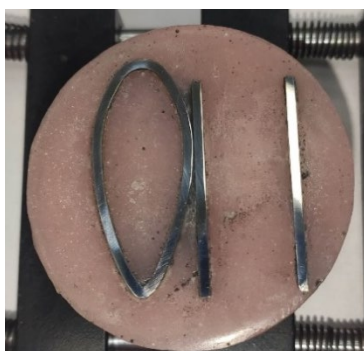
- исследование химического состава стали с применением искрового оптико-эмиссионного спектрометра ИСКРОЛАЙН-300К (Россия);
- металлографические исследования микроструктуры подготовленных микрошлифов в оптическом металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-41 (ЛОМО, Россия);
- определение прочностных характеристик сталей при испытаниях на растяжение по ГОСТ 1497-84 [12] на разрывной машине УТС 110М-50 0-У (ТЕСТСИСТЕМЫ, Россия).
- измерение твердости образцов на твердомере МЕТОЛАБ-101 (ООО «Метолаб», Россия).

Для экспериментальных исследований использовались образцы, вырезанные из оригинальной итальянской стальной трубы (рис. 1) и образцы отечественных сталей, составы которых приведены в табл. 1.

1. Химические составы потенциальных отечественных сталей – аналогов по ГОСТ 4543-2016

1. Chemical compositions of potential domestic analog steels according to GOST 4543-2016

Содержание элементов, %							
Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B
20X	0,17...0,23	0,17...0,37	0,50...0,80	0,70...1,00	< 0,3	< 0,11	-
20ХГР	0,18...0,24	0,17...0,37	0,70...1,00	0,75...1,05	< 0,3	< 0,11	0,008...0,005
18ХГ	0,15...0,21	0,17...0,37	0,90...1,20	0,90...1,20	< 0,3	< 0,11	-



а)



б)

Рис. 1. Образцы оригинальной стали:

а – для металлографических исследований; б – для испытаний на растяжение

Fig. 1. Samples of the original steel:

а – for metallographic studies; б – for tensile tests

Результаты проведённых исследований

Анализ напряженно-деформированного состояния деталей направляющего аппарата

гоночного автомобиля «Формула Восток» производится по двум видам нагружения: с толкающей тягой и с тянущей тягой (рис. 2).

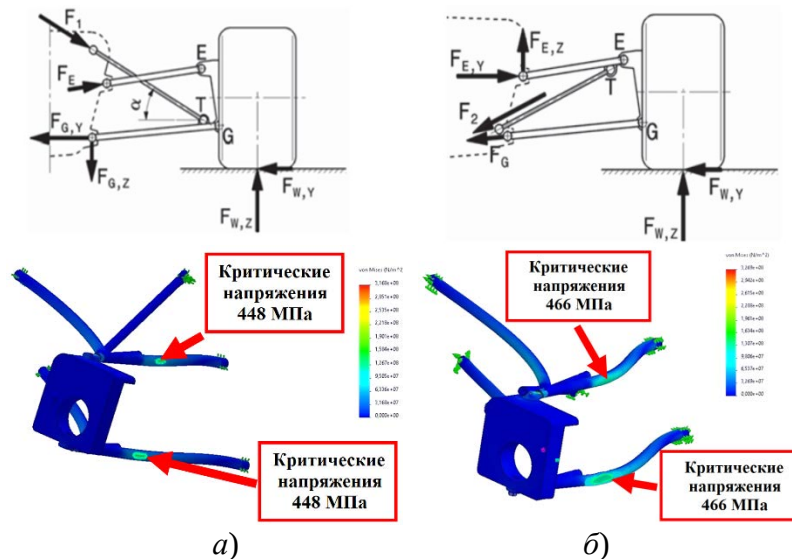


Рис. 2. Модели напряженно-деформированного состояния деталей направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля «Формула Восток»:

a – подвеска с толкающей тягой; *б* – подвеска с тянущей тягой

Fig. 2. Models of the stress-strain state of the parts of the steering unit of the Formula Vostok racing car: *a* – suspension with a striking rod; *b* – traction-driven suspension

Результаты моделирования показали, что наибольшие критические напряжения в рычагах направляющего аппарата гоночного автомобиля (466 МПа) возникают при нагружении подвески тянущей тягой. Для гоночных автомобилей коэффициент запаса прочности элементов конструкции подвески выбирается равный 1,2. Это делается с целью обеспечения минимального веса неподрессоренных масс гоночного автомобиля. Таким образом, предельно допустимое напряжение для стали

деталей подвески в данном случае составляет $\sigma = 560$ МПа.

Результаты химического анализа образца оригинальной трубы представлены в табл. 2: она изготовлена из низкоуглеродистой стали, легированной хромом, с микродобавками молибдена. Сравнение показывает, что по основным элементам зарубежной стали в наибольшей степени соответствует отечественная конструкционная сталь 20Х (табл. 2).

2. Химический состав оригинальной стали элемента подвески

2. Chemical composition of the original steel of the suspension member

Содержание элементов, %							
Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al
основа	0,226	0,205	0,685	1,076	0,103	0,203	0,037

При сопоставлении механических свойств оригинальной стали и потенциального заменителя установлено, что как по твердости, так и по прочностным характеристикам трубный прокат из российской стали 20Х в состоянии поставки существенно уступает исходной стали (табл. 3). Вместе с тем, сталь 20Х

обладает более высоким относительным удлинением. При этом диаграммы растяжения сравниваемых сталей различаются (рис. 3). Для стали 20Х получена кривая с площадкой текучести, тогда как оригинальная сталь имеет диаграмму, характерную для малопластичных материалов.

3. Механические и структурные характеристики сравниваемых сталей

3. Mechanical and structural characteristics of the compared steels

Сталь	Твердость	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Размер зерна $d_{ср}$, мкм/балл по ГОСТ 5639-82
Оригинал	105 HRB (280 HB)	834	625	4	4 / №13
20Х*	95 HRB (212 HB)	580	375	15	6 / №12

Примечание. * – в состоянии поставки

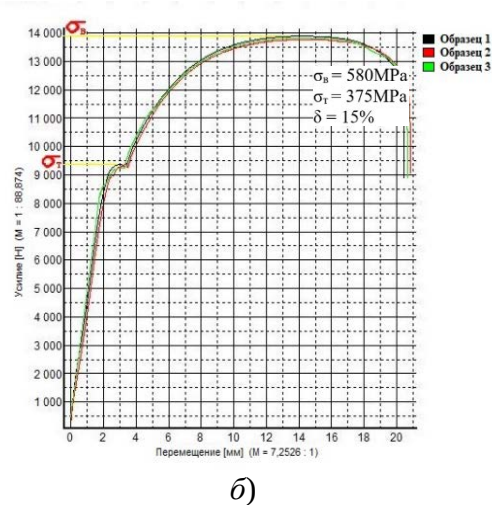
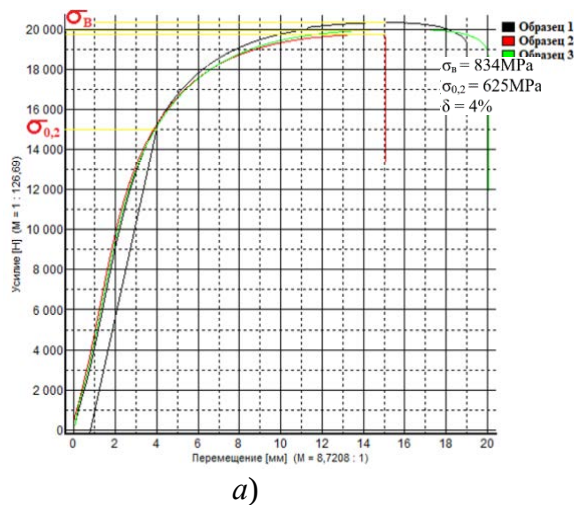


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов:
 а – оригинал; б – сталь 20Х в состоянии поставки

Fig. 3. Stretching diagrams of the samples:
 а – original; б – steel 20X in the state of supply

Различия в свойствах сравниваемых сталей обусловлены их микроструктурой. Металлографические исследования микрошлифов показали, что обе стали имеют ферритно-перлитную структуру (рис. 4, 5). Но оригинальная

сталь имеет структуру более мелкозернистую (табл. 3), а перлитная составляющая раздроблена на мелкие фрагменты, в отличие от стали 20Х в поставке, где перлит находится в пластинчатом виде.

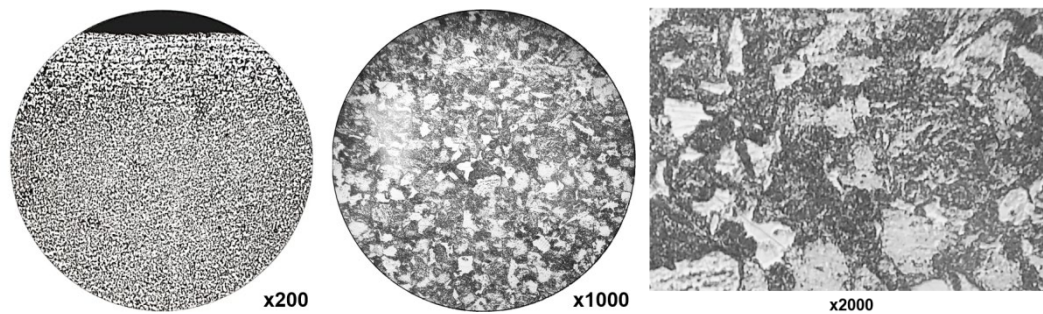


Рис. 4. Микроструктура стали – оригинала при различных увеличениях

Fig. 4. Microstructure of original steel at various magnifications

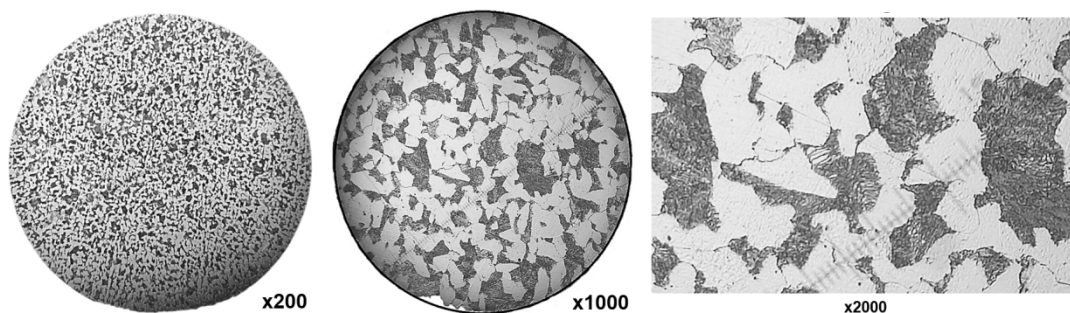


Рис. 5. Микроструктуры стали – аналога 20Х в состоянии поставки

Fig. 5. Microstructures of 20X analog steel in the state of supply

В поверхностном участке оригинальной стали наблюдается некоторая полосчатость, оставшаяся после горячей прокатки. Также на поверхности различима небольшая зона обезуглероживания толщиной 0,15...0,17 мм (рис. 4, $\times 200$).

Можно предположить, что наблюдающаяся в оригинальной стали структура получена в результате применения комбинированного метода деформационной термоциклической обработки [13], который позволил создать значительное упрочнение.

С целью увеличения прочностных свойств стали 20Х, предлагаемой в качестве заменителя, образцы были подвергнуты термической обработке в виде улучшения: заалке в масло с температуры 880 °С с последующим высоким отпуском при температуре 600 °С. Металлографическое исследование микрошлифа после проведённой термической обработки, показало, что микроструктура стали представляет собой зернистый сорбит (рис. 6).

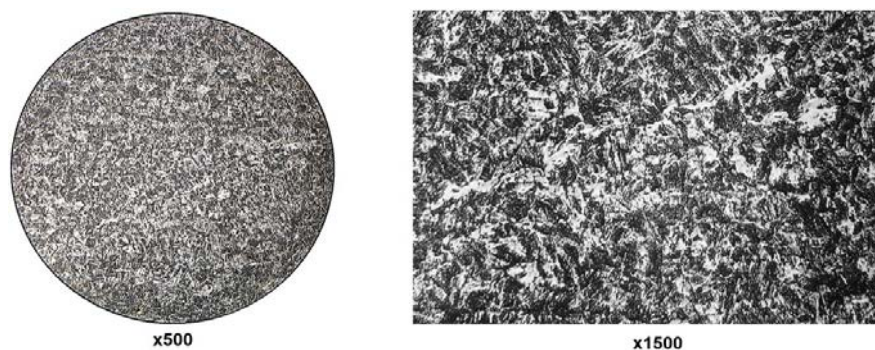


Рис. 6. Микроструктура стали 20Х после заалки и высокого отпуса

Fig. 6. Microstructure of 20X steel after quenching and high tempering

Твёрдость образцов стали 20Х после улучшения существенно повышается и достигает значения твёрдости оригинальной стали – 105 HRB (280 HB). Испытания на растяжение показали (рис. 7), что предел прочности ($\sigma_B = 824$ МПа) увеличился практически до уровня характеристики оригинальной стали ($\sigma_B = 834$ МПа), а предел текучести ($\sigma_T = 760$ МПа) даже превышает значение для исходной стали ($\sigma_{0,2} = 625$ МПа), как и относительное удлинение ($\delta = 8\%$).

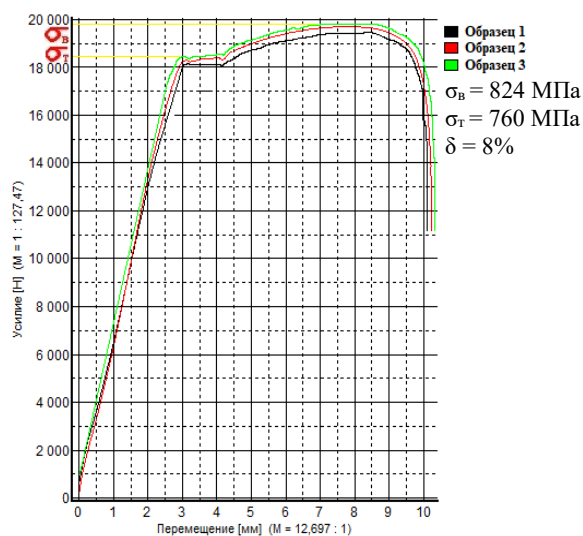


Рис. 7. Диаграмма растяжения образцов из стали 20Х после улучшения (закалка и высокий отпуск)

Fig. 7. Stretching diagram of 20X steel samples after improvement (quenching and high tempering)

Заключение

На основе комплекса металловедческих исследований определены химический состав, особенности микроструктуры и характеристики базовых механических свойств оригинальной итальянской стали, используемой для изготовления деталей направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток». Сравнительные исследования позволили предложить в качестве заменителя исходной стали наиболее подходящую по составу и механическим свойствам российскую сталь марки 20Х. Оптимальная структура стали и наиболее близкие к оригиналу прочностные свойства достигаются после термической обработки в виде улучшения: закалки в масло с температуры 880 °С и последующего высокого отпуска при температуре 600 °С.

Преимуществами предлагаемой в качестве заменителя стали являются повышенная пластичность и предел текучести, а также ее доступность и невысокая стоимость.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chung K.F., Ho H.C., Feng W. Selection of equivalent steel materials to European steel materials specifications: Professional guide PG-003. Hong Kong: Polytechnic University, 2021. 276 p.
2. Kumar Y., Siddiqui R.A., Upadhyay Y., Prajapati S. Kinematic and Structural Analysis of Independent type suspension system with Anti-Roll bar for Formula Student Vehicle // Materials Today: Proceedings. 2022. № 56. Part 5. P. 2672–2679.
3. Biswal S., Prasanth A., Udayakumar R., Deva S., Gupta A. Design of a suspension system and determining suspension parameters of a medium downforce small Formula type car, MATEC // Web of Conferences 124, 07006 ICTTE. 2017. № 12. P. 1–6.
4. Patil A., Patil S., Shah M., Sall N. Design and analysis of suspension system with different material for SUPRA SAE INDIA // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2018. V. 9. № 3. P. 32–36.
5. Samant S.Y., Santosh K., Kaushal K. J., Sudhanshu K. B., Dhiraj G., Sivapuram R., Karuna K. Design analysis of formula student race car suspension system : 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015 // ScienceDirect. 2018. № 1931. P. 1138–1149.
6. Kashem S.B., Mustapha K.B., Kannan S., Roy S., Safe A.A., Chowdhury M.A., Choudhury T.A., Ektesabi M., Nagarajah R. A study and review on vehicle suspension system and introduction of a high-bandwidth configured quarter car suspension system // Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2015. № 9 (30). P. 59–66.
7. Wang H. Enhancing vehicle suspension system control performance based on the improved extension control // Advances in Mechanical Engineering. 2018. № 10 (7). P. 1–13.
8. Петрова Л.Г., Лихачёва Т.Е., Малахов А.Ю. Исследовательский комплекс для мониторинга структурного состояния конструкционных материалов и его применение при анализе разрушений стальных деталей автомобилей // Вестник МАДИ. 2013. № 2 (33). С. 11–17.
9. Малахов А.Ю., Карелина М.Ю., Петрова Л.Г., Перекрестов А.Е., Перекрестова В.А. Применение метода моделирования напряженно-деформированного состояния при производстве автотехнической экспертизы // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2021. № 1 (1). С. 29–40.
10. ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 01.10.2017 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. 50 с
11. Шестопалова Л.П., Лихачева Т.Е., Петрова Л.Г., Перекрестов А.Е., Малахов А.Ю. Металловедческие исследования причин усталостных

разрушений коленчатых валов ДВС при проведении автотехнической экспертизы/ Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2022. № 1 (2). С. 37–58.

12. **ГОСТ 1497-2023.** Металлы. Методы испытаний на растяжение: межгосударственный стандарт: дата введения 01.07.2024 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2024. 49 с.

13. **Прудников А.Н., Прудников В.А.** Структура и свойства листовой стали 10, подвергнутой деформационной термоциклической ковке // Развитие технических наук в современном мире : сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции 11 декабря 2016 г. Сибирский государственный индустриальный университет, 2016. С. 39–42.

REFERENCES

1. Chung K.F., Ho H.C., Feng W. Selection of equivalent steel materials to European steel materials specifications: Professional guide PG-003. Hong Kong: Polytechnic University, 2021. 276 p.

2. Kumar Y., Siddiqui R.A., Upadhyay Y., Prajapati S. Kinematic and Structural Analysis of Independent type suspension system with Anti-Roll bar for Formula Student Vehicle // Materials Today: Proceedings. 2022. № 56. Part 5. P. 26722679.

3. Biswal S., Prasanth A., Udayakumar R., Deva S., Gupta A. Design of a suspension system and determining suspension parameters of a medium downforce small Formula type car, MATEC // Web of Conferences 124, 07006 ICTTE. 2017. № 12. P. 1–6.

4. Patil A., Patil S., Shah M., Sall N. Design and analysis of suspension system with different material for SUPRA SAE INDIA // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2018. V. 9. № 3. P. 32–36.

5. Samant S.Y., Santosh K., Kaushal K. J., Sudhanshu K. B., Dhiraj G., Sivapuram R., Karuna K. Design analysis of formula student race car suspension system : 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015 // ScienceDirect. 2018. № 1931. P. 1138–1149.

6. Kashem S.B., Mustapha K.B., Kannan S., Roy S.,

Safe A.A., Chowdhury M.A., Choudhury T.A., Ektesabi M., Nagarajah R. A study and review on vehicle suspension system and introduction of a high-bandwidth configured quarter car suspension system // Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2015. № 9 (30). P. 59–66.

7. Wang H. Enhancing vehicle suspension system control performance based on the improved extension control // Advances in Mechanical Engineering. 2018. № 10 (7). P. 1–13.

8. Petrova L.G., Likhacheva T.E., Malakhov A.Yu. Research complex for monitoring the structural condition of structural materials and its application in the analysis of destruction of steel parts of automobiles // Vestnik MADI, 2013, no. 2 (33), pp. 11–17.

9. Malakhov A.Yu., Karelina M.Yu., Petrova L.G., Perekrestov A.E., Perekrestova V.A. Application of the stress-strain state modeling method in the production of automotive technical expertise. // Problems of expertise in the automotive and road industry, 2021, no. 1 (1), pp. 29–40.

10. **GOST (All-Union State Standard) 4543-2016.** Metal products made of structural alloy steel. Technical specifications: interstate standard: date of introduction 01.10.2017 / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (MGS). Moscow: FSUE «Standartinform», 2019, 50 p.

11. Shestopalova L.P., Likhacheva T.E., Petrova L.G., Perekrestov A.E., Malakhov A.Yu. Metallographic studies of the causes of fatigue failures of crankshafts engine during the automotive expertise / Problems of expertise in the automotive and road industry, 2022, no. 1 (2), pp. 37–58.

12. **GOST (All-Union State Standard) 1497-2023** Metals. Tensile testing methods: interstate standard: date of introduction 07/01/2024 / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (MGS). Moscow: Federal State Budgetary Institution «Institute of Standardization», 2024, 49 p.

13. Prudnikov A.N., Prudnikov V.A. Structure and properties of sheet and plate steel 10 subjected to deformation thermocyclic forging // Development of technical sciences in the modern world: proceedings based on the results of the international scientific and practical conference on December 11, 2016. Siberian State Industrial University, 2016, pp. 39–42.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 03.12.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 03.12.2024; assepted for publication 10.12.2024.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.11-22.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P.11-22.

Научная статья
УДК: 669.35.5:621.793
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-11-22

Структурно-фазовые превращения, массоперенос и триботехнические характеристики газодинамических медно-цинковых покрытий при трении скольжения

Лидия Ивановна Куksenova¹, Д.Т.Н.
Владимир Евгеньевич Архипов², К.Т.Н.
Максим Сергеевич Пугачев³, Н.С.
Дмитрий Александрович Козлов⁴, К.Т.Н.

^{1, 2, 3, 4} Институт Машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

¹ lkukc@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9207-6587>

² vearkhipov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8106-1408>

³ pugachevma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9159-8831>

⁴ kozlov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Исследовали влияние температуры нанесения покрытия и величины смещения сопла распылителя на структурно-фазовые превращения в покрытиях на стали 40Х, полученном методом холодного газодинамического напыления порошковой смеси состава Cu:Zn:Al₂O₃=35:35:30 % масс. С помощью метода локального рентгеноспектрального анализа идентифицирован фазовый состав покрытия. Показано, что при газодинамическом напылении в покрытии могут образовываться пять фаз, формирующиеся в результате превращений в твердом состоянии в условиях высокоскоростного ударного контактного взаимодействия: α-твердый раствор Cu – Zn; β'-твердый раствор на базе соединения CuZn; γ-твердый раствор на основе Cu₅Zn₈; ε-твердый раствор на основе соединения CuZn₃; η-твердый раствор Zn – Cu. При температурах напыления 270 и 360 °С преобладающей фазой является α-твердый раствор Cu – Zn. Триботехнические испытания пары реверсивного трения скольжения сталь 40Х (с покрытием) – сталь ШХ15 в среде масла И-20А показали, что сопряжение обладает высокой работоспособностью при контактных давлениях не менее 50 МПа. Деформация, диффузия и фрикционный массоперенос в зоне контактного взаимодействия приводят к реализации эффекта «классической безызносности», отличительной особенностью которого является формирование медно-цинкового третьего тела с вкраплениями корунда, обладающего способностью прямого и обратного переноса покрытия, обеспечивая защиту поверхностных слоёв пары трения от разрушения. Высокая износостойкость контактирующих материалов пары трения достигается благодаря плёнкам фрикционного массопереноса.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, латуни, структура, диффузия, фазовый состав, конструкционные материалы, трибологические свойства, фрикционный массоперенос

Для цитирования: Куksenova Л.И., Архипов В.Е., Пугачев М.С., Козлов Д.А. Структурно-фазовые превращения, массоперенос и триботехнические характеристики газодинамических медно-цинковых покрытий при трении скольжения // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 11–22. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-11-22

Structural and phase transformations, mass transfer, and tribotechnical characteristics of gas-dynamic copper-zinc coatings occurring under sliding friction

Lidiya I. Kuksenova¹, D.Eng.
Vladimir E. Arkhipov², Ph.D. Eng.
Maxim S. Pugachev³, Research Officer
Dmitry A. Kozlov⁴, Ph.D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Institute of Machines Science named after A.A.Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ lkukc@mail.ru

² vearkhipov@mail.ru

³ pugachevma@mail.ru

⁴ kozlov74@mail.ru

Abstract. The effect of the coating temperature and the displacement of the spray nozzle on the structural and phase transformations in the coating on 40X steel obtained by cold gas-dynamic spraying of a powder mixture of Cu:Zn: Al₂O₃=35:35:30 (% wt) has been studied. The phase composition of the coating was identified using the method of

local X-ray spectral analysis. It was shown that under gas-dynamic spraying there can be five phases gradually occurring in the coating, being formed as a result of solid state transformations under conditions of high-speed impact contact interaction: α -Cu – Zn solid solution; β' -CuZn-based solid solution; γ -Cu₅Zn₈-based solid solution; ε -CuZn₃-based solid solution.; η is a solid solution of Zn – Cu. Under sputtering temperatures of 270 and 360 °C, the α – Cu – Zn solid solution phase becomes predominant. Tribotechnical tests of a pair of reversible sliding friction steel 40X (coated) – steel SHX15 in an I-20A oil medium have shown that the coupling has high performance at contact pressures of at least 50 MPa. Deformation, diffusion and frictional mass transfer in the zone of contact interaction lead to the realization of the «classical wearlessness» effect, the distinctive feature of which is the formation of a copper-zinc third body with corundum inclusions and capable of direct and reverse coating transfer, providing protection of the surface layers of the friction pair from destruction. High wear resistance of the friction pair contacting materials is achieved due to the frictional mass transfer films.

Keywords: gas dynamic spraying, brass, structure, diffusion, phase composition, structural materials, tribological properties, frictional mass transfer

For citation: Kuksenova L.I., Arkhipov V.E., Pugachev M.S., Kozlov D.A. Structural and phase transformations, mass transfer, and tribotechnical characteristics of gas-dynamic copper-zinc coatings occurring under sliding friction / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 11–22. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-11-22

Введение

Выбор конструкционных материалов триботехнического назначения для тяжело-нагруженных сопряжений определяется комплексом функциональных и эксплуатационных характеристик применительно к условиям реального применения. К таким характеристикам в первую очередь относится износостойкость и несущая способность поверхностных эксплуатационных слоев.

Для изготовления деталей пар трения скольжения используются разнообразные конструкционные материалы [1]. Для стальных тяжело-нагруженных сопряжений эффективным средством повышения их нагрузочной способности является создание модифицированных поверхностных слоев. С этой целью применяются разнообразные методы, основанные на принципах химического, электрохимического и физического осаждения и формирования покрытий на поверхности изделий [2]. В качестве материалов покрытий широкое распространение получили медные сплавы вследствие их способности создавать предпосылки для реализации положительного градиента механических свойств по толщине поверхностного эксплуатационного слоя и, следовательно, локализовать в нем физико-химические и деформационные процессы, ответственные за формирование частиц износа [3]. При этом в основе триботехнической эффективности медьсодержащих поверхностных слоев является фрикционный массоперенос, который определяется их структурно-механическим состоянием.

Массоперенос материала с одной поверхности на другую является универсальным

эффектом и имеет место практически при всех механизмах изнашивания, являясь одним из важных составляющих, которые влияют на уровень поверхностного разрушения, несущую способность контакта и ресурс узла трения в целом. На основе результатов экспериментальных исследований в [4] описаны представления о наиболее распространенных механизмах фрикционного массопереноса. Наибольший эффект повышения износостойкости материала наблюдается при фрикционном массопереносе в условиях избирательного переноса [3]. Суть механизма состоит в создании в зоне контакта слоя меди в результате физико-химических факторов при трении в поверхностно-активной смазочной среде и его переноса на сопряженное стальное контртело. Этот процесс имеет циклический характер, вызванный перераспределением дислокационной структуры и легирующих элементов, в результате чего пара трения переходит в режим практической безызносности.

Ярко проявляется эффект массопереноса при трении антифрикционных подшипниковых сплавов, в составе которых содержится мягкая структурная составляющая [5]. Вследствие существенно отличающихся механических свойств структурных фаз подшипникового сплава в процессе силового контактного взаимодействия на поверхность трения выдавливается более мягкая из них. При достижении определенной толщины процесс формирования пленки переноса достигает стабильного режима вследствие перехода матрицы в упругое состояние (этот период соответствует завершению режима приработки). Значение этой

толщины определяется аналитически по соотношению:

$$h_p = 0,2 l_k (K_2 / K_1) (1 - 2\mu)^{1/2}, \quad (1)$$

где l_k – длина пятна фактического контакта; K_2 – предел текучести пленки переноса; K_1 – предел текучести основной фазы; μ – коэффициент трения.

Эксперименты показывают, что толщина пленки переноса имеет микронный масштаб, что согласуется с представлениями, положенными в основу соотношения (1). Это дает основание сделать вывод, что выжимаемая из матрицы мягкая структурная составляющая частично выполняет роль твердого смазочного материала: с ней связано повышение износостойкости сплава, его противозадирной стойкости, и несущей способности контакта [5].

Наиболее выражен фрикционный массоперенос в парах трения, когда антифрикционным материалом служит полимер, контртелом металлический образец [6]. Отмечается несколько последовательных этапов процесса формирования пленки переноса: 1 – под действием повышения температуры в зоне контакта когезионная прочность полимера снижается, и при достижении порогового значения полимер переносится на поверхность контртела; 2 – в результате адгезионного взаимодействия на поверхности металлического контртела формируется пленка переноса; 3 – в объеме пленки переноса создается циклическое напряженно-деформированное состояние; 4 – завершением является накопление повреждаемости в пленке переноса, часть которой остается в виде защитной вторичной структуры, а другая удаляется из зоны контакта в виде продуктов износа. Толщину пленки фрикционного переноса h предлагается оценивать по формуле:

$$h = r/R(at/\pi)^{1/2} - [r\lambda(T_n - T_0)/2Rq_c],$$

где r – размер образца; R – размер траектории скольжения; a , λ – коэффициенты тепловых свойств полимера; T_0 , T_n – температура среды и полимера в зоне контакта соответственно; q_c – характеристика теплового потока [6]. Расчет согласуется с экспериментами.

Триботехническая эффективность пленки переноса связывается с явлением самосмазывания полимеров при трении.

В работе [7] изучалась кинетика переноса мягкого металлического покрытия на основе меди, нанесенного газотермическим напылением на поверхность стального образца (испытания проводились при трении в нормальных условиях и в высокотемпературной агрессивной среде). Установлено, что медьсодержащие покрытия в нормальных условиях испытаний обеспечивают работоспособность сопряжения без смазочного материала за счет фрикционного массопереноса в зоне контакта, но в условиях высокотемпературной агрессивной среды эффект массопереноса не столь значительный.

Современный уровень науки о материалах триботехнического назначения указывает на комплекс процессов механо-физико-химической природы, приводящих к универсальному явлению при трении, называемому фрикционным массопереносом. Результаты теоретических и экспериментальных исследований дают основание сделать вывод, что в основе природы триботехнической эффективности пленок фрикционного массопереноса лежат состав антифрикционного материала, структура, характеристики механических свойств, внешних условий испытаний, толщина пленки фрикционного переноса, величины адгезии и когезии. При разных сочетаниях конструктивных и смазочных материалов пар трения явление фрикционного массопереноса служит средством понижения энергосиловых условий на контакте и, следовательно, средством управления работоспособностью материалов триботехнического назначения.

В настоящее время для увеличения ресурса стальных пар трения получает применение метод «холодного» газодинамического напыления сплавов на основе меди. Он позволяет наносить функциональные покрытия на локальные участки и значительные площади поверхности деталей в заводских и полевых условиях при минимальном разогреве подложки (≤ 160 °C). Метод основан на введении в нагретый поток воздуха, истекающего из сопла распылителя со скоростью выше скорости звука, механической смеси металлических частиц. Прочность адгезионной связи с

подложкой достигает величины ≈ 50 МПа, а когезионная прочность – ≈ 100 МПа [8]. Столь высокие значения адгезии и когезии покрытия позволяют ей сохранять адгезионное взаимодействие с подложкой в течение всего срока эксплуатации [9].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния параметров газодинамического напыления медно-цинкового покрытия на структурно-фазовые превращения в твёрдой фазе, массоперенос в многокомпонентной градиентной структуре покрытия, и применения этого покрытия в паре реверсивного трения скольжения сталь – сталь.

Материалы и методики исследования. Покрытие на сталь 40Х наносилось с помощью установки ДИМЕТ–404 при скорости перемещения сопла относительно образца 10 мм/с и расстояния от сопла до поверхности, равном 10 мм (рис. 1). Применяли механическую смесь частиц меди, цинка и корунда в соотношении $\text{Cu:Zn:Al}_2\text{O}_3 = 35:35:30$ % масс. при температуре потока воздуха 270, 360, 450 и 540 °С и смещением сопла 2 и 3 мм.

Перемещение сопла вдоль края образца позволяет получить слой металла шириной около 5,5 мм, имеющего в сечении вид сегмента окружности (рис. 1, рис. 2). Наносится первый слой, и затем сопло смещается на $L = 2$ мм (перекрытие ≈ 64 %) или $L = 3$ мм (перекрытие ≈ 55 %) относительно ранее нанесенного слоя металла, после чего при обратном ходе сопла наносится следующий слой со смещением. Время напыления на образец размером 15×15 мм при смещении сопла на $L = 3$ мм составляет 20...22 с и при смещении на $L = 2$ мм 28...30 с [10]. Для получения достаточной толщины покрытия (150...450 мкм) напыление проводится многократно за счёт нанесения покрытий друг на друга (разных циклов напыления), рис. 2.

Фазовый состав покрытий исследовали на дифрактометре Rigaku Ultima IV на $\text{Cu-K}\alpha$ излучении. Анализ дифрактограмм проводили на основе базы данных PDF-2. Рентгеноспектральный анализ регистрировали с помощью установки Rigaku PrimusII. особенности морфологии и элементного состава покрытия выявляли на сканирующем электронном микроскопе FEI «Quanta-650».

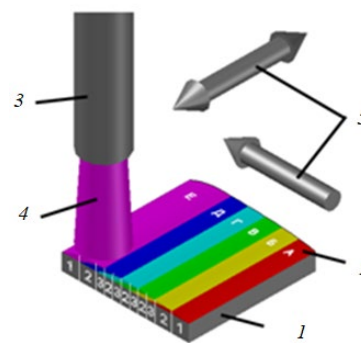


Рис. 1. Схема нанесения покрытия:

1 – подложка; 2 – покрытие; 3 – сопло; 4 – поток напыляемых частиц; 5 – направление движение сопла и подложки

Fig. 1. Coating application scheme:

1 – substrate; 2 – coating; 3 – nozzle; 4 – flow of sprayed particles; 5 – direction of movement of the nozzle and substrate

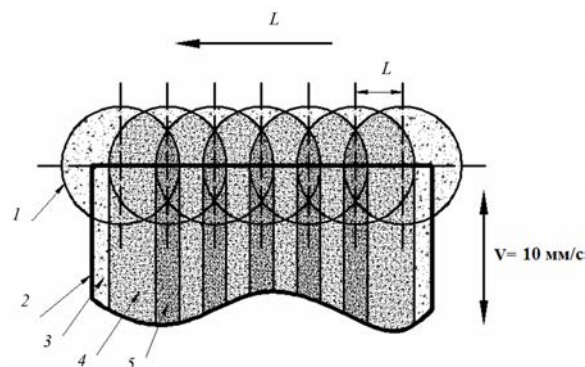


Рис. 2. Схема обработанной поверхности при смещении сопла на $L = 2$ мм:

1 – проекция сопла; 2 – образец; 3 – области поверхности образца, подвергаемые воздействию частиц один раз; 4 – два раза; 5 – три раза

Fig. 2. Scheme of the treated surface with a nozzle displacement of $L = 2$ mm:

1 – nozzle projection; 2 – sample; 3 – sample surface areas exposed to particles one time; 4 – twice; 5 – three times

Испытания на износ проводили на машине трения МТ-8 с возвратно-поступательным движением сопрягаемых плоских образцов при средней скорости скольжения 0,19 м/с, ступенчатом повышении контактного давления до 50 МПа в промышленном масле И-20А.

Результаты исследования и их обсуждение. Для идентификации структурно-фазовых превращений в результате взаимодиффузии цинка и меди в процессе напыления порошковой смеси наиболее достоверным является локальный рентгеноспектральный анализ. Рассмотрим

результаты этого исследования, проведённого по трассе, начинающейся на частице меди, проходящей по частице цинка и заканчивающейся на частице меди (трасса представляет собой частицы Cu – Zn – Cu), рис. 3.

Если рассматривать изменение содержания меди в частице цинка на рис. 3, а (температура напыления 270 °С), слева направо, то на первом участке концентрация меди снижается от 100 % до ≈ 95 % и затем резко падает до точки перегиба, где ее массовая доля составляет ≈ 60 %. В соответствии с диаграммой состояния Cu – Zn рассмотренную область следует отнести к α -твёрдому раствору Cu – Zn, а ближе к содержанию меди 60 % – к области существования α -фазы и β' -твёрдого раствора электронного типа на базе

Cu – Zn [11]. С увеличением трассы сканирования содержание меди повышается до ≈ 90 %, что соответствует α -твёрдому раствору Cu – Zn, и затем резко снижается до концентрации 22 %, соответствующей области ϵ -твёрдого раствора электронного типа на базе CuZn₃. При смещении к центру частицы цинка концентрация меди увеличивается до ≈ 42 %, и на некотором отрезке трассы содержание компонентов практически не изменяется. Такому соотношению меди и цинка соответствует область γ -твёрдого раствора электронного типа на базе Cu₅Zn₈. Далее содержание меди снижается к области ϵ -фазы ($\approx 15\ldots 20$ %) и сохраняется на этом уровне, а затем через резкое повышение (60 %) и снижение (30 %) ее концентрация увеличивается и достигает 100 %.

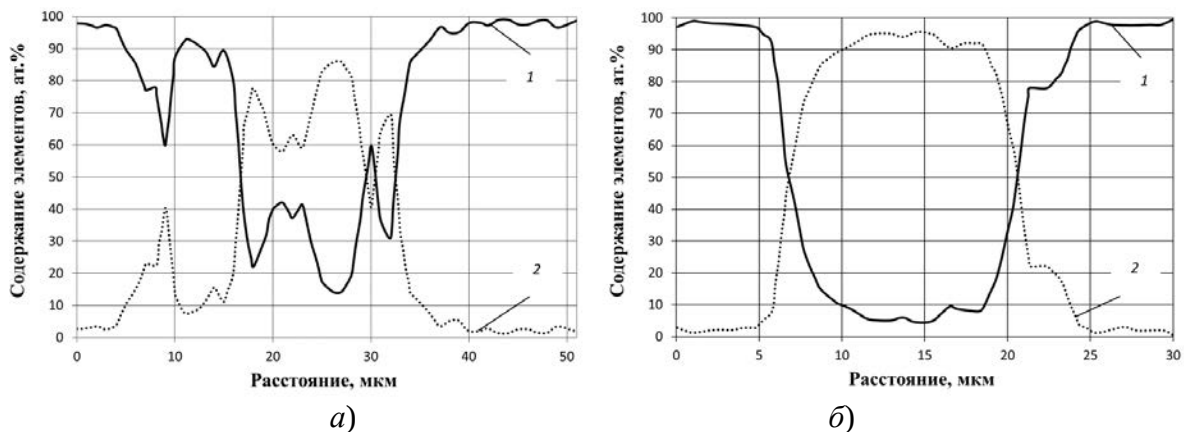


Рис. 3. Распределение меди и цинка по трассе сканирования покрытий:
а – напыленных при 270 °С; б – напыленных при 360 °С; 1 – Cu; 2 – Zn

Fig. 3. Distribution of copper and zinc along the scanning path of coatings:
а – sprayed at 270 °С; б – sprayed at 360 °С; 1 – Cu; 2 – Zn

При повышении температуры напыления до 360 °С, рис. 3, б, характер изменения концентрации меди в частице цинка изменяется; его особенность состоит в симметричном распределении меди и отсутствии скачков концентрации компонентов. Содержание меди достаточно плавно и симметрично снижается со 100 % до 92 %, потом резко уменьшается до концентрации 13 %, после чего плавно выходит на «плато» с содержанием 5...7 % Cu. Содержание меди в верхней части кривой соответствует области α -твёрдого раствора Cu – Zn, а нижняя – области η -твёрдого раствора Zn – Cu и ϵ -твёрдого раствора

электронного типа на базе CuZn₃. Вся остальная часть кривой концентрации в соответствии с диаграммой состояния Cu – Zn состоит из твёрдых растворов электронного типа на основе Cu₅Zn₈ (γ -фаза) и на основе CuZn (β' -фазы).

Таким образом, локальный анализ продемонстрировал, что в частице цинка формируются диапазоны концентрации меди и цинка, которые в соответствии с диаграммой состояния Cu – Zn, указывают наличие основных фаз, присущих латуням.

Известно [12], что формирование зоны диффузии металлов и фазового состава в

твёрдом состоянии при контакте меди и цинка происходит в результате диффузии цинка в медь. Отношение коэффициента диффузии цинка к коэффициенту диффузии меди, вычисленное, например, для ε -фазы, составляет ($D_{Zn}:D_{Cu}=47$), и это соотношение может достигать (80 : 1) [12]. Поэтому отмеченная выше диффузия меди в цинк является исключением из общего закона формирования фаз на основе системы Cu – Zn. Эта особенность указывает на наличие факторов, присущих газодинамическому способу нанесения покрытий. Есть основания полагать, что эта особенность диффузии обусловлена процессом высокоскоростного ударного контактного взаимодействия частиц Cu, Zn, Al_2O_3 между собой и с обрабатываемой поверхностью, что и приводит к реализации разных структурно-фазовых превращений в зависимости от параметров технологии напыления.

Исследование среднего по объему химического состава медно-цинковых напыленных покрытий указывает на его отличие от исходного порошкообразного состояния, а также на зависимость концентрации элементов в покрытии от температуры напыления, что обусловлено энергетическими характеристиками процесса в условиях контактного ударного взаимодействия частиц металлов [8, 13], табл. 1. При температуре напыления 270 °C и 360 °C содержание компонентов практически не зависит от величины смещения сопла и составляет: концентрация меди 82,08 % и 82,20 %, концентрация цинка – 17,38 % и 17,70 % (смещение сопла 2 мм и 3 мм соответственно при температуре 270 °C); при температуре 360 °C концентрация меди достигает 69,03 % и 69,41 %, цинка – 30,42 % и 30,10 % (соответственно для смещения сопла 2 и 3 мм). При этом основной структурной составляющей является α -твёрдый раствор Cu – Zn.

1. Элементный состав медно-цинкового покрытия

1. Elemental composition of copper-zinc coating

Температура, °C	Смещение, мм	Химические элементы, ат. %		Основные фазы
		Cu	Zn	
270	2	82,08	17,38	α
	3	82,20	17,70	α
360	2	69,03	30,42	α
	3	69,41	30,10	α
450	2	53,80	45,40	$\alpha + \beta'$
	3	56,87	41,87	$\alpha + \beta'$
540	2	50,07	49,37	β'
	3	45,33	53,83	$\beta' + \gamma$

При повышении температуры до 450 °C содержание меди в покрытии уменьшается (53,8 % и 56,87 %), а цинка – увеличивается (45,4 % и 41,87 %). Увеличение температуры потока газа до 540 °C приводит к дальнейшему снижению концентрации меди и повышению цинка и, соответственно, к изменению структурно-фазового состава покрытия.

Следовательно, можно сделать вывод, что экспериментально установленные концентрации элементов в объеме покрытия также указывают на образование латуней в однофазном и многофазном состояниях, что согласуется с результатами локального спектрального и диаграммой состояния Cu – Zn, рис. 4 [14].

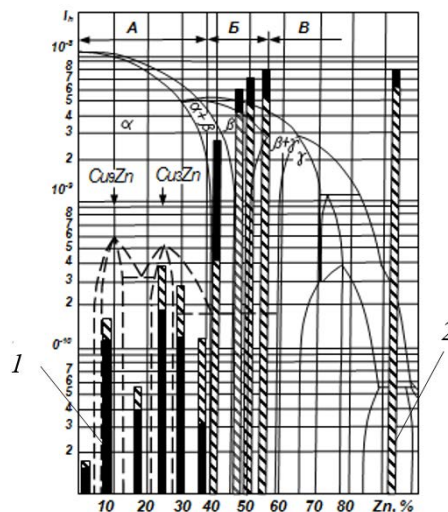


Рис. 4. Диаграмма состояния Cu – Zn и зависимость интенсивности изнашивания латуней (показана столбиками) от концентрации цинка:

1 – соответствует испытаниям при 7,5 МПа; 2 – соответствует испытаниям при 3,1 МПа

Fig. 4. The Cu – Zn phase diagram and the dependence of the wear rate of brass (shown by columns) on the zinc concentration:

1 – the blackened part corresponds to tests at 7,5 MPa; 2 – the blackened part corresponds to tests at 3,1 MPa

Таким образом, при газодинамическом напылении в покрытия могут образоваться пять фаз, формирующихся в результате превращений в твердом состоянии в условиях высокоскоростного ударного контактного взаимодействия: α -твердый раствор Cu-Zn; β' -твердый раствор электронного типа на базе соединения CuZn; γ -твердый раствор электронного типа на базе Cu_5Zn_8 ; ϵ -твердый раствор электронного типа на базе CuZn_3 ; η -твердый раствор Zn – Cu.

Как отмечалось выше, состав порошковой смеси содержит корунд, назначение которого сводится к усилению энергосиловых условий взаимодействия частиц меди и цинка (за счёт ударов корундом частицы меди и цинка деформируются, создаются условия для усиления диффузионных процессов, покрытие уплотняется и повышается его когезионная и адгезионная прочность).

Заметим, что при содержании цинка до 30 % возрастают одновременно прочность и пластичность, что позволяет использовать эти сплавы для изготовления деталей триботехнического назначения. При более высоком содержании цинка ($\approx 40\%$) пластичность латуни резко уменьшается в связи с появлением в структуре хрупкой β' -фазы. Прочность увеличивается до концентрации цинка $\approx 45\%$, а затем падает так же резко, как и пластичность.

Дополнительным процессом, формирующим изменение структурно-фазового состояния покрытия с целью достижения требуемых эксплуатационных структурно-чувствительных характеристик, является термическая обработка [15]. Нагрев при температуре $\approx 420^\circ\text{C}$ и выдержке 1 ч покрытия, нанесённого при 450°C и двух циклах напыления, создают условия для модификации медно-цинкового покрытия до латуни, которая по фазовому и химическому составу соответствует марке Л63. Термическая обработка покрытия, нанесённого при температуре 270°C и 360°C и пяти циклах напыления с коэффициентом перекрытия 64 % и 55 %, позволяет получить латуни типа Л80 (79...81 ат. % Cu), Л70 (69...72 ат. % Cu) или Л68 (67...70 ат. % Cu).

Эти латуни широко используются для изготовления подшипников трения скольжения, антифрикционных узлов деталей поршневых компрессоров, колец торцовых уплотнителей, массивных червячных винтов, втулок, вкладышей, работающих в тяжёлых условиях трения. Есть основания полагать, что некоторые из этих деталей могут быть изготовлены из сталей с покрытиями типа латуней, полученными газодинамическим напылением порошков Cu – Zn – Al_2O_3 . Основанием для такого предположения служит совокупность результатов экспериментальных исследований структурно-фазового состояния покрытий, которая может

служить методологической основой создания покрытий для таких пар трения скольжения.

Применение медных сплавов для триботехнических целей связано с возможностью реализации в парах трения правила положительного градиента свойств по глубине зоны контактного взаимодействия, что обеспечивает требуемый уровень работоспособности [16]. Установлено [14], что для обеспечения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых латуней требуется гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока. Кроме того, для условий контактной деформации уровень разрушения металлических поверхностей узлов трения находится в прямой зависимости от механических свойств их приповерхностных слоев [16], в то время как уровень характеристик механических свойств металлов – в прямой зависимости от внутренней структуры (внутризеренного и дислокационного строения) [17].

На примере трения пары латунь – сталь в среде глицерина рассмотрим основные структурные изменения в зоне деформации при трении, которые обеспечивают существенное повышение их износостойкости [18].

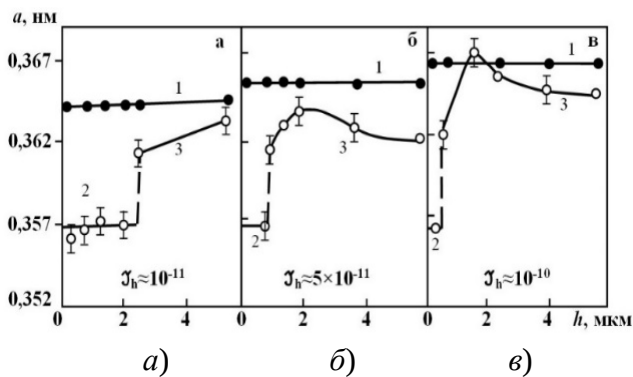


Рис. 5. Изменение периода a кристаллической решетки α -твердого раствора латуней по глубине зоны деформации при трении:

a – Л90; b – Л80; c – Л63; 1 – α -твердый раствор Cu – Zn до трения; 2 – пленка меди, 3 – α -твердый раствор Cu – Zn после трения; J_h – интенсивность изнашивания

Fig.5. Change in the period a of the crystal lattice of the α -solid solution of brasses by the depth of the deformation zone during friction:

a – L90; b – L80; c – L63; 1 – α -solid solution Cu – Zn before friction; 2 – copper film, 3 – α -solid solution Cu – Zn after friction; J_h – wear intensity

Можно отметить следующие особенности. В отличие от исходного состояния (линии 1) в результате длительного пути трения первоначально однородный по составу приповерхностный слой приобретает двухслойную структуру, состоящую из сформировавшегося в результате трения мягкого приграничного слоя меди (линии 2) и субслоя α -твердого раствора Cu – Zn с вариативно измененным периодом решетки по глубине (линии 3). Обеднение поверхностного слоя происходит вследствие процесса восходящей диффузии, стимулированной сжимающими внутренними напряжениями I рода [19]. На поверхности латуни Л90 образуется сжатая пленка меди толщиной ≥ 2 мкм. В более глубоком слое толщиной до 5 мкм наблюдается положительный градиент концентрации α -твердого раствора Cu – Zn, рис. 5, a .

При увеличении концентрации цинка в латунях Л80 и Л63 (рис. 5, b , c) также создается двухслойная структура зоны деформации, однако толщина пленки меди существенно меньше (~ 1 мкм в Л80 и $\sim 0,5$ мкм в Л63). В этих сплавах кривая изменения периода решетки α -твердого раствора имеет максимум в глубине зоны деформации, что указывает на формирование локальных неоднородностей сплава, являющихся причиной изменения интенсивности изнашивания J_h : Л90 – $\sim 10^{-11}$; Л80 – $\sim 10^{-10}$; Л63 – $\sim 10^{-9}$.

Формирующаяся мягкая структурная составляющая в виде пленки меди в результате фрикционного массопереноса создается на стальном контртеле, защищая поверхность от износа, и в целом пара достигает режима практической безызносности.

В табл. 2 приведены величины интенсивности изнашивания модельных сплавов Cu – Zn с широким диапазоном концентрации цинка. Видно, что наибольшая износостойкость соответствует сплаву с его низкой концентрацией. С увеличением количества цинка в сплаве растет интенсивность изнашивания, табл. 2, рис. 4. Кроме того, для сплавов, состав которых соответствует области концентраций ≥ 30 % Zn, износ значительно снижается с ростом внешней нагрузки. Это свойство является отличительным признаком эффекта безызносности, поэтому реализация в паре трения этого явления дает наилучший результат при эксплуатации тяжело-нагруженных узлов в условиях трения [20].

2. Зависимость интенсивности изнашивания J_h сплавов Cu – Zn от концентрации цинка C_{zn} при давлениях P в трибоконтакте

2. Dependence of wear intensity J_h of Cu – Zn alloys on zinc concentration C_{zn} at pressures P in tribocontact

	$J_h, 10^{-10}$				
$C_{zn}, \% \text{ масс.}$ $P, \text{ МПа}$	3	8	30	43	50
3,1	1,8	1,8	2,8	4,0	5,0
7,5	1,2	1,2	1,2	2,5	7,0

Приведенные данные относятся к паре трения сталь – антифрикционный сплав, которым является латунь в монолитном состоянии. Несмотря на это, они дают основание полагать, что формируя покрытие типа латуни методом газодинамического напыления, можно создать на поверхности трения пары сталь-сталь поверхностный слой со структурно-механическим состоянием, также обладающим высокой износостойкостью.

Рассмотрим результаты триботехнических испытаний подобного сопряжения. На рис. 6 приведены зависимости величины износа стали 40X с покрытием и контртела стали ШХ15 от величины ступенчато повышаемого давления. Видно, рис. 6, а, что после небольшого пути трения при малой нагрузке

наблюдается резкое уменьшение износа покрытия. С этого момента проявляется прямой и обратный фрикционный массоперенос латуни. Регистрируется увеличение массы контртела за счет массопереноса сплава Cu – Zn на сталь ШХ15, рис. 6, б. Дальнейшее увеличение давления до 10 МПа сопровождается интенсификацией фрикционного переноса медного сплава на контртело ШХ15 и обратного переноса на сталь 40X. В диапазоне давлений до 10 МПа износ образца с покрытием практически равен нулю. Износ сопряженного образца (контртела стали ШХ15) при всех нагрузках не наблюдается: поверхность трения полностью защищена покрытием, которое формируется в результате фрикционного массопереноса латуни.

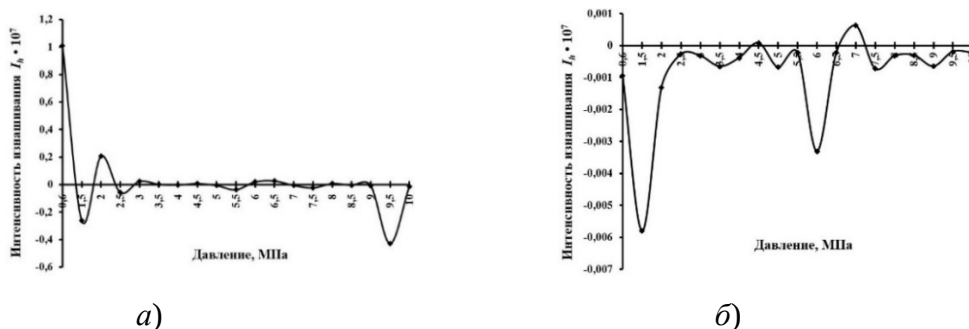


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления:

а – сталь 40X с покрытием; б – контртело сталь ШХ15 (величина отрицательного износа указывает на формирование пленки фрикционного переноса)

Fig. 6. Dependence of wear intensity on contact pressure:

а – 40X steel with coating; б – counterbody steel ШХ15 (the magnitude of negative wear indicates the formation of a friction transfer film)

Термическая обработка нанесённого покрытия при температуре $\approx 420^\circ\text{C}$ сопровождается формированием α -твёрдого раствора Cu-Zn в количестве 75 % и 12 % β' -фаз [8]. Триботехнические испытания пары показывают, рис. 7, что на начальных этапах

испытаний усиливается нестабильность изнашивания, что, очевидно, вызвано присутствием β' -фазы, а в процессе повышения нагрузки увеличивается толщина слоя фрикционного переноса на поверхности контробразца, указывая на повышение триботехнической

эффективности покрытия. При этом поверхность контртела также не подвергается износу (частично разрушается только перенесенное покрытие на отдельных участках пути трения,

рис. 7, б); сталь 40Х с покрытием имеет минимальный уровень разрушения поверхности, рис. 7, а).

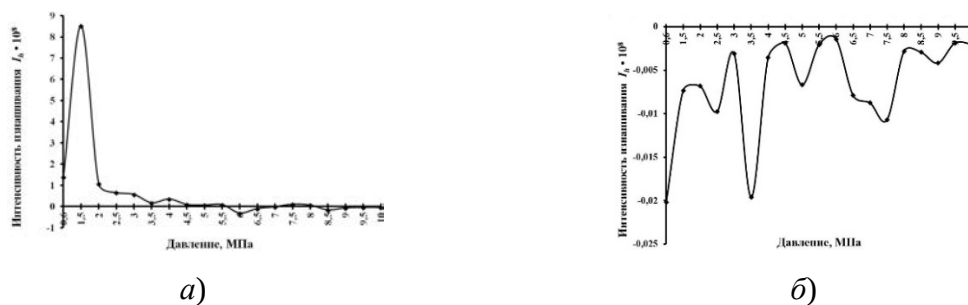


Рис. 7. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления:
а – сталь 40Х с покрытием после термической обработки; б – контртело сталь ШХ15

Fig. 7. Dependence of wear intensity on contact pressure:
а – 40X steel with a coating that has undergone heat treatment; б – counterbody steel ШХ15

С целью выявления диапазонов давлений, при котором такая пара трения работоспособна, была проведена оценка несущей способности покрытия, рис. 8. Результаты длительных испытаний в условиях

тяжелонагруженного контакта показали, что пара трения сталь – сталь с латунным покрытием за счет фрикционного массопереноса в зоне контакта обладает высокой работоспособностью при давлении более 50 МПа.

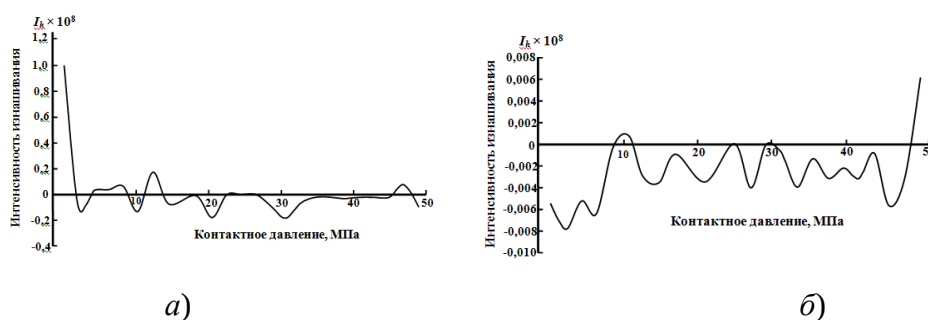


Рис. 8. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления:
а – покрытия Cu – Zn – Al₂O₃ на стали 40Х; б – контртела ШХ15

Fig. 8. Dependence of the wear rate on the contact pressure:
а – of the Cu – Zn – Al₂O₃ coating on steel 40X; б – the counterbody ШХ15

Закключение.

Показано, что при газодинамическом напылении порошка Cu, Zn, Al₂O₃ состава 35 %:35 %:30 (% масс.) в результате превращений в твердом состоянии в условиях высокоскоростного ударного контактного взаимодействия в покрытие могут образовываться пять фаз: α-твердый раствор Cu – Zn; β'-твердый раствор электронного типа на базе соединения CuZn; γ-твердый раствор электронного типа на базе Cu₅Zn₈; ε-твердый раствор электронного

типа на базе CuZn₃; η-твердый раствор Zn – Cu. При температурах напыления 270 и 360 °С превалирующей фазой является α - твердый раствор Cu – Zn. При вариации параметров технологии были сформированы покрытия типа латуни на стали 40Х.

Результаты лабораторных испытаний реверсивных пар трения сталь 40Х с медноцинковым покрытием по стали ШХ15 показали, что диффузионное взаимодействие в зоне фрикционного контакта приводит к эффектам, близким к классической безызносности.

Отличительной особенностью этого процесса является формирование медно-цинкового третьего тела, которое обеспечивает прямой и обратный фрикционный массоперенос слоя покрытия, подверженного пластической деформации при трении, обеспечивая защиту от разрушения поверхностей контактного взаимодействия. Высокая износостойкость материалов пары трения достигается благодаря пленкам фрикционного массопереноса, обеспечивающих поддержание состава эксплуатационного слоя, контактное взаимодействие которого подчиняется правилу положительного градиента его свойств по глубине зоны деформации при несущей способности ≥ 50 МПа.

Твёрдые частицы корунда в составе покрытия, вступая в контакт с поверхностью контртела, активируют зону трения, усиливая диффузионные процессы, и создают дополнительные микронеровности, которые способствуют захвату, прямому и обратному переносу, а также удержанию микрочастиц покрытия на поверхности трения.

Структурные принципы формирования износостойкого состояния материала зоны контактной деформации, в состав которой входит латунь, состоят из модифицирования поверхности и формирования защитной пленки переноса, в которой происходит циклический процесс накопления и разрядки дислокаций, обуславливая долговечность покрытия с минимальным уровнем поверхностного разрушения. Этот эффект возрастает с увеличением контактного давления (несущей способности поверхностного слоя).

Резерв качественного улучшения трибо-технических характеристик покрытий на основе меди, для которых характерно явление интенсивного фрикционного массопереноса в зоне контактного взаимодействия, заключается в применении поверхностно-пластифицирующих смазочных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Конструкционные материалы.** Справочник / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
2. **Елагина О.Ю.** Методы создания износостойких покрытий. М.: НЕДРА, 2010. 570 с.
3. **Kuksenova L.I., Savenko V.I.** Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in

Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Friction and Wear. 2023. V. 44. № 6. P. 333–345.

4. **Погосян А.К., Оганесян К.В.** Явление фрикционного переноса: основные закономерности и методы исследования // Трение и износ. 1986. Т.7. №6. С. 998–1008.

5. **Буше Н.А., Алексеев Н.М., Трушин В.В., Маркова Т.Ф.** Механические процессы формирования вторичных структур подшипниковых сплавов // Трение и износ. 1981. Т.11. №2. С. 212–220.

6. **Погосян А.К., Оганесян К.В., Исаджанян А.Р.** Фрикционный перенос и самосмазывание полимеров // Трение и износ. 2010. Т.31. №1. С. 109–119.

7. **Сачек Б.Я., Архипов В.Е., Мезрин А.М., Муравьева Т.И., Щербакова О.О.** Металлофизическое исследование кинетики фрикционного массопереноса напыленных мягких металлов антифрикционного назначения / В кн. Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин; отв. ред. Г.В. Москвитин. М.: ЛЕНАНД, 2019. С. 409–419.

8. **Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.** Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий. М.: КРА-САНД, 2017. 240 с.

9. **Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.** Кинетическая модель разрушения адгезионного соединения порошкового покрытия и металлического субстрата // Научные технологии в машиностроении. 2023. №1 (139). С. 9–19.

10. **Архипов В.Е., Муравьева Т.И., Пугачев М.С., Шкалей И.В.** Влияние технологических параметров газодинамического напыления на структурно - фазовые превращения в покрытиях типа «латуни» // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. № 12. С. 554–560.

11. **Ефремов Б.Н.** Латунь. От фазового строения к структуре и свойствам. М: ИНФРА-М, 2020. 314 с.

12. **Смитлз К.Дж.** Металлы. Справочник. М: Металлургия, 1980. 447 с.

13. **Биргер Е.М., Архипов В.Е., Поляков А.Н.** Газодинамическое напыление. Физические основы и параметры процесса // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. № 6. С. 262–270.

14. **Куксенова Л.И., Поляков С.А.** Методологические основы выбора состава латуней для узлов трения скольжения в среде поверхностно-активных смазочных материалов // ВНТР. 2022. № 164. С. 10–22.

15. **Архипов В.Е., Муравьева Т.И., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Щербакова О.О.** Влияние термической обработки на фазовый состав медно-цинкового покрытия на сталях // МиТОМ. 2023. №7. С. 3–7.

16. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

17. **Бернштейн М.Л., Займовский В.А.** Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1970. 472 с.

18. **Куксенова Л.И., Савенко В.И.** Системно-структурный анализ трибологического поведения антифрикционного материала в парах трения, функционирующих в поверхностно-активных смазочных средах // Трение и износ. 2024. Т.45. №5. С. 430–448.

19. **Куксенова Л.И., Савенко В.И.** Методологические основы материаловедческой оценки качества

смазочных материалов для нагруженных сопряжений машин и механизмов. Сообщение 1. Влияние среды на напряженно-деформированное состояние и структурные изменения в зоне контактной деформации металлов при трении // Научные технологии в машиностроении. 2024. №11 (161). С. 3–13.

20. Куksenova Л.И., Дякин С.И., Титов В.В., Громаковский С.Д., Вячеславова Л.А., Рыбакова Л.М. Влияние структурных изменений и свойств поверхностных слоев материалов на несущую способность и долговечность шарнирно-болтовых соединений // Трение и износ. 1988. Т.9. № 3. С. 422–423.

REFERENCES

1. Construction materials. Directory / under total. scientific ed. by B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 688 p.

2. Elagina O.Y. Methods of creating wear-resistant coatings. Moscow: NEDRA, 2010, 570 p.

3. Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Friction and Wear, 2023. V. 44. № 6. P. 333–345.

4. Pogosyan A.K., Oganessian K.V. The phenomenon of frictional transfer: basic patterns and research methods // Friction and wear, 1986, vol. 7, no. 6, pp. 998–1008.

5. Boucher N.A., Alekseev N.M., Trushin V.V., Markova T.F. Mechanical processes of formation of secondary structures of bearing alloys // Friction and wear, 1981, vol.11, no.2, pp. 212–220.

6. Poghosyan A.K., Oganessian K.V., Isajanyan A.R. Friction transfer and self-lubrication of polymers // Friction and wear, 2010, vol.31, no. 1, pp. 109–119.

7. Sachek B.Ya., Arkhipov V.E., Mezrin A.M., Muravyeva T.I., Shcherbakova O.O. Modification of the Tribocouplings by Spraying Metal Coatings to Improve Their Fretting Resistance / Promising methods of surface treatment of machine parts; ed. by G.V. Moskvitin, Moscow: LE-NAND, 2019, pp. 409–419.

8. Arkhipov V.E., Londarsky A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. Gas dynamic spraying: structure and properties of coatings. Moscow: KRASAND, 2017, 240 p.

9. Solovyov M.E., Raikhvarger A.B., Baldaev S.L., Baldaev L.H. Kinetic model of destruction of adhesive bounding of a powder coating and a metal substrate //

Science intensive technology in mechanical engineering, 2023, no. 1 (139), pp. 9–19.

10. Arkhipov V.E., Muravyeva T.I., Pugachev M.S., Shkaley I.V. Influence of technological parameters of gas dynamic spraying on structural and phase transformations in the «brass» type coating // Strengthening technologies and coatings, 2020, no. 12, pp. 554–560.

11. Yefremov B.N. Brass. From phase structure to structure and properties. Moscow: INFRA-M, 2020. 314 p.

12. Smithles K. J. Metal. Guide. Moscow: Metallurgiya, 1980, 447 p.

13. Birger E.M., Arkhipov V.E., Polyakov A.N. Gas dynamic spraying. Physical fundamentals and process parameters // Strengthening technologies and coatings, 2019, no. 6, pp. 262–270.

14. Kuksenova L.I., Polyakov S.A. Methodological foundations for selecting the composition of brasses for sliding friction nodes in surface-active lubricants // VNTR, 2022, no. 164, pp. 10–22.

15. Arkhipov V.E., Muravyeva T.I., Moskvitin G.V., Pugachev M.S., Shcherbakova O.O. Effect of heat treatment on the phase composition of copper-zinc coating on steels // MiTOM, 2023, no.7, pp. 3–7.

16. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.

17. Bernstein M.L., Zaimovsky V.A. Structure and mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 1970, 472 p.

18. Kuksenova L.I., Savchenko V.I. System-structural analysis of tribological behavior of antifriction material in friction pairs operating in surfactants // Friction and wear, 2024, vol. 45, no. 5, pp. 430–448.

19. Kuksenova L.I., Savchenko V.I. Methodological foundations of the materials science assessment of the quality of lubricants for loaded integrations of machines and mechanisms. Message 1. The influence of the medium on the stress-strain state and structural changes in the zone of contact deformation of metals during friction // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2024, no. 11 (161). pp. 3–13.

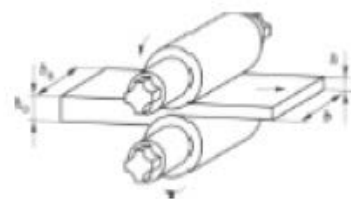
20. Kuksenova L.I., Dyakin S.I., Titov V.V., Gromakovsky S.D., Vyacheslavova L.A., Rybakova L.M. Influence of structural changes and properties of surface layers of materials on the bearing capacity and durability of hinged bolted joints, Trenie Iznos, 1988, vol. 9. no. 3, pp. 422–423.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.12.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 24.12.2024.

The article was submitted 09.12.2024; approved after reviewing 16.12.2024; assepted for publication 24.12.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.23-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P. 23-29.

Научная статья
УДК 621.98; 539.375
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-23-29

Верхнеграничный расчет изотермической осадки кольцевой заготовки

Алексей Владимирович Черняев¹, Д.Т.Н.

Владимир Николаевич Чудин², Д.Т.Н.

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ sovet01tsu@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² vladimir-chudin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Высокопрочные материалы обрабатывают давлением в изотермических условиях с нагревом в оснастке на гидропрессовом оборудовании. При этом наряду с деформационным упрочнением материал заготовки проявляет вязкие свойства, т. е. является вязко-пластичным. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологии обработки давлением, т. к. силовые режимы штамповки и предельные возможности формоизменения существенно зависят от скорости операции. Рассмотрена осадка с нагревом кольцевой заготовки в условиях вязко-пластичности. Предложены соотношения для расчета силового и деформационного режимов осадки кольцевой заготовки при схеме осевой симметрии. Для расчета силового режима использован энергетический метод баланса мощностей внутренних и внешних сил. На контактных поверхностях инструмента и кольцевой заготовки принят закон трения Кулона. Расчет мощностей внутренних сил производился в блоке деформаций и на поверхностях разрыва скоростей перемещений в соответствии с выбранным кинематически возможным полем скоростей, включая поверхности трения. Оптимизация поля скоростей проводилась по принципу минимума давления операции. Оценка повреждаемости материала заготовки выполнена по энергетическому и деформационному критериям разрушения. Представлены расчетные результаты силы осадки и повреждаемости материала для высокопрочных сплавов алюминия и титана. Показано, что при изотермической осадке кольцевой заготовки сила уменьшается при низких скоростях операции. Повреждаемость ряда материалов, поведение которых описывается энергетической теорией разрушения, снижается при уменьшении скорости операции. Для материалов, подчиняющихся деформационной теории разрушения, скорость деформирования не оказывает влияния на повреждаемость, которая определяется только степенью деформации.

Ключевые слова: вязкопластичность, мощность, скорость, давление, повреждаемость материала

Для цитирования: Черняев А.В., Чудин В.Н. Верхнеграничный расчет изотермической осадки кольцевой заготовки // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 23–29 doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-23-29

Upper boundary calculation of isothermal yield of a ring blank

Alexey V. Chernyaev¹, D. Eng.

Vladimir N. Chudin², D. Eng.

¹ Tula State University, Tula, Russia

² Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ sovet01tsu@rambler.ru

² vladimir-chudin@yandex.ru

Abstract. High-strength materials are pressure-treated under isothermal conditions with heating using a hydraulic forging equipment. At the same time, along with strainer- hardening, the workpiece material exhibits viscous properties, i.e. it is viscoplastic. This factor must be taken into account when developing pressing technology, since the power modes of stamping and the maximum possibilities of shaping depend significantly on the speed of the operation. A yield with heating of a ring blank under viscoplastic conditions is viewed. The relations for calculating the force and deformation modes of a ring blank yield under the axial symmetry scheme are proposed. The energy method of balancing the capacities of internal and external forces was used to calculate the power regime. Coulomb's law of friction is adopted on both: tool contact surfaces and the ring blank. The internal force capacities were calculated in the deformation block and on the fracture surfaces of the displacement velocities in accordance with the selected kinematically possible velocity field, including the friction surfaces. The optimization of the velocity field was carried out according to the principle of minimum operating pressure. The assessment of the damage to the material of the blank is carried out according to the energy and deformation criteria of destruction. The calculated results of the yield force and material damage for high-strength aluminum and titanium alloys are presented. It is shown that under isothermal yield of a ring blank, the force decreases at low operating speeds. The damage rate of a number of materials, the behavior of which is described by the energy theory of destruction, decreases with a decrease in the speed of the operation. For materials subject to the deformation theory of fracture, the rate of deformation has no effect on damage, but is determined only by the degree of deformation.

Keywords: viscoplasticity, power, speed, pressure, material damage

For citation: Chernyaev A.V., Chudin V.N. Upper boundary calculation of isothermal yield of a ring blank / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-23-29

Введение

Процессы горячей осадки заготовок применяют в кузнечно-штамповочном производстве [1]. Высокопрочные материалы обрабатывают давлением в изотермических условиях с нагревом в оснастке на гидропрессовом оборудовании. При этом наряду с деформационным упрочнением материал заготовки проявляет вязкие свойства, т. е. является вязкопластичным. При заданной степени формообразования происходит релаксация напряжений, которая тем больше, чем меньше скорость деформирования [2 – 5]. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологии обработки давлением. Рассмотрим осадку с нагревом кольцевой заготовки в условиях вязкопластичности. Схему деформаций примем осесимметричной. Оценку силового режима операции произведем энергетическим методом [6, 7], используя кинематику процесса осадки. Схема осадки приведена на рис. 1.

Кинематика, мощность, давление

Для расчета давления осадки установим кинематику процесса. Воспользуемся разрывным полем скоростей перемещений (рис. 1, а), которое состоит из блока деформаций 1 и жестких блоков 0, 2, разделенных линиями разрыва 01, 12 скоростей. Линии разрыва являются образующими поверхностей вращения относительно оси координат x . Деформации происходят в блоке и на поверхностях разрыва скоростей. Скорость в блоке 1 зададим функцией:

$$v_1 = v_0 \left[1 + \frac{k(y - y_{01})}{y_{01} - r_2} \right] \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (1)$$

где

$$k = 1 - \frac{(r_2^2 - r_1^2) \sin(\alpha + \beta)}{2r_2 h \sin \alpha \sin \beta},$$

y – ордината вектора скорости; y_{01} – уравнение линии «01»; r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы кольцевой заготовки; h – конечная высота заготовки; α, β – углы поля скоростей. Функция (1) соответствует граничным условиям на входе в блок деформаций и на выходе из него, т. е.

$$v_{1\text{вх}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \text{ при } y_{01} = -x \tan \alpha + r_2; \quad v_{1\text{вых}} = \frac{v_0 (r_2^2 - r_1^2)}{2r_2 h \sin \beta} \text{ при } y = r_2.$$

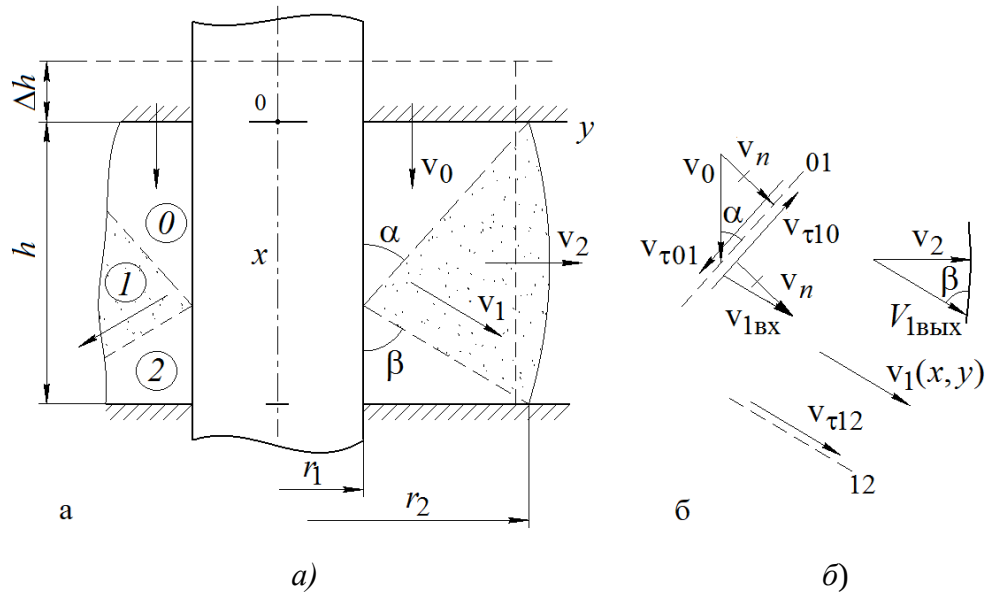


Рис. 1. Схема осадки:

a – поле; б – план скоростей перемещений материала заготовки

Fig. 1. Yield scheme:

a – field; б – plan of the speeds of movement of the blank material

Эквивалентная скорость деформаций в блоке 1 при осевой симметрии выражается соотношением [6]

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\phi^2) + \xi_{xy}^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$\xi_x = \frac{\partial v_{1x}}{\partial x}; \quad \xi_y = \frac{\partial v_{1y}}{\partial y}; \quad \xi_\phi = \frac{v_{1y}}{y}; \quad \xi_{xy} = \frac{\partial v_{1y}}{\partial x} + \frac{\partial v_{1x}}{\partial y} - \text{компоненты скорости деформаций;}$$

$$v_{1x} = v_1 \cos \beta; \quad v_{1y} = v_1 \sin \beta - \text{проекции скорости на оси координат } x, y.$$

Эквивалентная деформация в блоке 1 определяется как:

$$\varepsilon_e = \xi_e t = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_e. \quad (3)$$

Эквивалентное напряжение представим, учитывая состояние материала при вязкопластичности [2, 5] в виде:

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n = A \left(\frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \xi_e^{m+n}, \quad (4)$$

где Δh – рабочий ход плиты штампа; A , m , n – константы материала заготовки. Соотношение для мощности в рассматриваемом блоке деформаций получим с учетом выражений (1), (2), (4). Таким образом:

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dw = 2\pi A y_{ц.т.} \left(\frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \int_0^{r_2} \int_{y_{01}}^y \xi_e^{1+m+n} dy dx, \quad (5)$$

где w – объем блока l ; $y_{ц.т.}$ – ордината центра тяжести площади блока в продольном сечении.

Обратимся к линии разрыва скорости 01 . В соответствии с планом скоростей (рис. 1, б)

$$v_{n01} = v_0 \sin \alpha; \quad v_{\tau 01} = v_0 [\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)] \sin \alpha \quad (6)$$

где v_{n01} , $v_{\tau 01}$ – нормальная и касательная скорости. Эквивалентные скорость деформаций, деформацию и напряжение запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \xi_{01} &= \frac{v_{\tau 01}}{l_{01}} = \frac{v_{\tau 01} \sin \alpha}{r_2 - r_1}; \quad \varepsilon_{01} = \xi_{01} t = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_{01}; \\ \sigma_{01} &= A \left(\frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{r_2 - r_1} \right)^{m+n}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Мощность на данной поверхности разрыва скорости запишем, учитывая выражения (6) и (7), т. е.

$$N_{01} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{01} v_{\tau 01} S_{01} = \frac{\pi A (r_2^2 - r_1^2) \Delta h^m v_{\tau 01} v_0^n}{\sqrt{3} (\sin \alpha)^{1-m-n} (r_2 - r_1)^{m+n}} \quad (8)$$

На линии «12» имеем

$$v_{n12} = 0; \quad v_{\tau 12} = v_1 \text{ при } y = y_{12}; \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_{12} &= \frac{v_{\tau 12}}{l_{12}} = \frac{v_{\tau 12} \sin \beta}{r_2 - r_1}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_{12}; \\ \sigma_{12} &= A \left(\frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \left(\frac{v_{\tau 12} \sin \beta}{r_2 - r_1} \right)^{m+n}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где скорость

$$v_{\tau 12} = v_1 = v_0 \left[1 + \frac{k(y_{12} - y_{01})}{y_{01} - r_2} \right] \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (11)$$

где $y_{12} = (x - h) \operatorname{tg} \beta + r_2$. Мощность на этой поверхности

$$N_{12} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{12} v_{\tau 12} S_{12} = \frac{\pi A (r_2 + r_1) \Delta h^m v_0^{-m}}{\sqrt{3} (\sin \beta)^{1-m-n} (r_2 - r_1)^{m+n}} \int_c^h v_{\tau 12}^{1+m+n} dx, \quad (12)$$

где $c = (r_2 - r_1) \operatorname{ctg} \beta$.

Учтем трение на плоскостях кольцевой заготовки. Скорость движения материала на этих поверхностях выразим уравнением

$$v_{\text{тр.}} = \frac{v_2}{r_2 - r_1} (r - r_1) = \eta v_0 (r - r_1), \quad (13)$$

где $\eta = (r_1 + r_2)/(2r_2h)$; $v_2 = v_{1\text{вых}} \sin \beta$. Мощность трения представим, учитывая скорость (13), соотношением

$$N_{\text{тр.}} = \tau_{\text{тр.}} S_{\text{тр.}} \int v_{\text{тр.}} dr = \frac{\pi}{2} \mu q (r_2^2 - r_1^2)^2 \left(1 - \frac{2r_1}{r_1 + r_2} \right) \frac{v_0}{r_2 h}. \quad (14)$$

Примем, что $\tau_{\text{тр.}} = \mu q$; q - давление осадки; μ - коэффициент трения.

Давление операции определяется в соответствии с верхнеграничной теоремой пластичности [6, 7] с учетом выражений для мощностей (5), (8), (12), (14), т.е.

$$q \leq \frac{N_1 + N_{01} + N_{12} + N_{\text{тр.}}}{\pi(r_2^2 - r_1^2)v_0}. \quad (15)$$

Давление необходимо минимизировать по углу α , используя связь

$$\beta = \text{arccctg} \left(\frac{h}{r_2 - r_1} - \text{ctg} \alpha \right).$$

Давление, как следует из выражения (15), зависит от скорости осадки.

Повреждаемость материала

Оценку повреждаемости материала заготовки в результате осадки произведем в соответствии с уравнениями механики разрушения [6,7]. По энергетическому уравнению получим зависимость

$$\omega = \frac{1}{A_{\text{пр.}}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{A}{(1+m)A_{\text{пр.}}} \left(\frac{\Delta h}{v_0} \right)^{1+m} \xi_e^{1+m+n}, \quad (16)$$

по деформационному уравнению

$$\omega = \frac{1}{\varepsilon_{\text{епр.}}} \int \xi_e d \left(\frac{\Delta h}{V_0} \right) = \frac{\Delta h \xi_e}{V_0 \varepsilon_{\text{епр.}}}. \quad (17)$$

Здесь

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^h \int_{y_{01}}^{r_2} \left(2(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\varphi^2) + \xi_{xy}^2 \right)^{1/2} dy dx;$$

$0 \leq \omega \leq 1$ – повреждаемость материала; $A_{\text{пр.}}$, $\varepsilon_{\text{епр.}}$ – предельные константы разрушения.

Результаты и обсуждение

Расчеты выполнены для осадки кольцевой заготовки из титанового и алюминиевого сплавов. Константы сплавов приведены в табл. 1 [5].

1. Константы сплавов

1. Constants of alloys

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$A, \text{МПа}\cdot\text{с}^n$	m	n	$A_{\text{пр.}}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{\text{спр.}}$
АМг6	450	60	0,10	0,03	500	—
ВТ6С	900	70	0,03	0,05	—	1,2

Принято: $r_1 = 20\text{мм}$; $r_2 = 30\text{мм}$;
 $h = 50\text{мм}$; $\Delta h = 15\text{мм}$; $\alpha = 15^\circ$; $\beta = 35^\circ$;
коэффициент трения $\mu = 0,1$. Получено, что в
пределах скорости осадки
 $10 \leq v_0 \leq 150\text{мм/мин}$ давление менялось в
пределах $106 \leq q \leq 116\text{ МПа}$ для сплава

АМг6 и $120 \leq q \leq 138\text{ МПа}$ для сплава ВТ6С
(рис. 2). Таким образом, уменьшение скорости
операции приводит к уменьшению давления.
При малых скоростях осадки увеличивается
релаксация напряжений и, следовательно,
уменьшается давление.

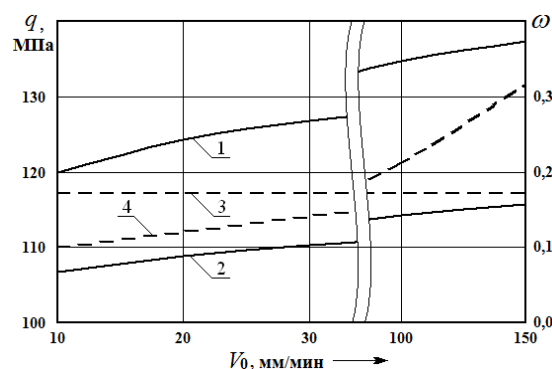


Рис. 2. Графики удельной силы и повреждаемости:

1, 2 – $q(v_0)$; 3, 4 – $\omega(v_0)$ для сплавов ВТ6С и АМг6, соответственно.

Fig. 2. Graphs of specific force and damage:

1, 2 – $q(v_0)$; 3, 4 – $\omega(v_0)$ for VT6C and AMg6 alloys, respectively.

Уменьшение давления с понижением скорости операции происходит также в процессах объемной [3, 4, 8] и листовой [5, 9 - 11] штамповки с нагревом на гидропрессовом оборудовании. Повреждаемость сплава АМг6 зависит от скорости осадки и в пределах указанной скорости составила $0,10 \leq \omega \leq 0,32$. Повреждаемость сплава ВТ6С при заданной температуре $\omega = 0,18$ зависит только от степени осадки.

Выводы

1. Горячая осадка на гидропрессовом оборудовании при малых скоростях деформирования происходит в условиях вязкопластичности. Материал заготовки релаксирует, что приводит к снижению давления

формоизменения. Давление снижается тем больше, чем меньше скорость операции.

2. Повреждаемость деформируемого материала может зависеть от скорости операции или только от степени формоизменения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка и штамповка:** справочник: в 4 т. / ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. Т.2: Горячая объемная штамповка / А.П. Атрошенко [и др.]; под ред. Е.И. Семенова. 2010. 720 с.
2. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
3. **Чудин В.Н., Платонов В.И., Романов П.В.** Вариационная оценка режима осадки при сварке давлением // Научные технологии в машиностроении. 2021. №3(117). С. 16–18. doi: 10.30987/2223-4608-2021-3-16-18

4. Черняев А.В., Чудин В.Н. Изотермическая безоблойная штамповка при нестационарном вязкопластическом деформировании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. №2. С. 16–21.

5. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М: Машиностроение 1; Изд-во ТулГУ, 2004. 427 с.

6. Теория обработки металлов давлением / В.А. Голенков [и др.]; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. 3-е изд. М: Машиностроение, 2013. 441 с.

7. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.

8. Пасынков А.А. Высадка фланца на деталях трубопроводов при вязкопластическом нестационарном деформировании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 3. С. 10–15.

9. Платонов В.И., Пасынков А.А., Чудин В.Н. Технологические режимы вытяжки анизотропного релаксирующего материала // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 2 (128). С. 22–25. doi: 10.30987/2223-4608-2022-2-22-25

10. Пасынков А.А., Яковлев Б.С. Горячий обжим крупногабаритных трубных заготовок // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 7–11. doi: 10.30987/2223-4608-2021-12-7-11

11. Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 21–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

REFERENCES

1. Forging and stamping: a reference book: in 4 volumes / ed. Council: E.I. Semenov (prev.) [et al]. 2nd ed.,

revised. Moscow: Mashinostroenie, 2010, vol. 2: Hot volumetric stamping / A.P. Atroshenko [et al.]; edited by E.I. Semenov, 2010, 720 p.

2. Malinin N.N. Creep in metalworking. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 216 p.

3. Chudin V.N., Platonov V.I., Romanov P.V. Variation assessment of yield mode at pressure welding // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no.3(117), pp. 16–18. doi: 10.30987/2223-4608-2021-3-16-18

4. Chernyaev A.V., Chudin V.N. Isothermal flash-free stamping with non-stationary viscoplastic deformation // Forging and stamping production. Pressure treatment of materials, 2019, no. 2, pp. 16–21.

5. Isothermal deformation of high-strength anisotropic metals / S.P. Yakovlev, V.N. Chudin et al. Moscow: Mashinostroenie 1; TulSU Publishing House, 2004. 427 p.

6. Theory of metal processing by pressure / V.A. Golenkov [et al.]; edited by V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 2013, 441 p.

7. Kolmogorov V.L. The Mechanics of Metal Processing under Pressure: Textbook, Yekaterinburg: Ural State Technical University (UGTU-UPI), 2001, 836 p.

8. Pasinkov A.A. Upsetting of a flange on pipeline parts during viscoplastic unsteady deformation // Forging and stamping production. Pressure treatment of materials, 2021, no. 3, pp. 10–15.

9. Platonov V.I., Pasinkov A.A., Chudin V.N. Technological modes of anisotropic relaxing material drawing // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 2 (128), pp. 22–25. doi: 10.30987/2223-4608-2022-2-22-25

10. Pasinkov A.A., Yakovlev B.S. Hot crimping of large-sized pipe blanks // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 12 (126). pp. 7–11. doi: 10.30987/2223-4608-2021-12-7-11

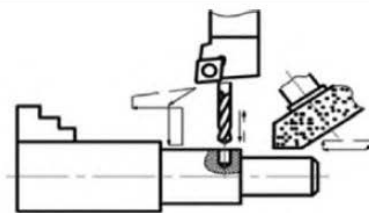
11. Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2024, no. 6 (156), pp. 21–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.12.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 08.12.2024; approved after reviewing 11.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.30-39.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P.30-39.

Научная статья

УДК 621.923

doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-30-39

Перенос продуктов износа абразивного материала при царапании и шлифовании титана

Владимир Андреевич Носенко¹, д.т.н.

Семен Павлович Кузнецов², к.т.н.

Никита Денисович Сердюков³, старший преподаватель

Валентин Олегович Харламов⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3} Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

⁴ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ vladim.nosenko2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>

² cemen1894@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6924-3380>

³ serdyukov-nikita@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9026-9016>

⁴ harlamov_vo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

Аннотация. Внедренные продукты износа абразивного инструмента на поверхности ответственных изделий из титановых сплавов являются критическим дефектом, способным значимо снижать срок службы узла из-за интенсивного абразивного износа контактирующих поверхностей и образования усталостных трещин. На примере резания единичным зерном показано, что в результате микроскалывания абразивного материала уменьшается перенос металла на контактирующие поверхности зерна и происходит внедрение продуктов износа в обрабатываемую поверхность. При шлифовании инструментами из сверхтвёрдых материалов возможность контроля и управления данным процессом методом рентгеноспектрального анализа ограничена в результате значительной погрешности определения малых концентраций легких элементов. С целью измерения параметров переноса продуктов износа абразивного материала, предложен способ, основанный на анализе изображений шлифованных поверхностей, полученных в обратно-рассеянных электронах. На основании результатов элементного анализа определен состав продуктов износа и погрешности измерения параметров переноса при шлифовании кругами из карбида кремния и кубическим нитридом бора (КНБ), а именно числа и площади внедренных частиц. Доля внедренных кристаллов абразивных материалов для кругов из карбида кремния – 80 % и для кругов из КНБ – 70 %, в том числе 20 % кристаллы корунда (наполнитель).

Ключевые слова: титан, карбид кремния, кубический нитрид бора, микроцарапание, шлифование, перенос материала, химический состав

Финансирование: исследование выполнено за счет средств программы развития ВолГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 45/649-24

Для цитирования: Носенко В.А., Кузнецов С.П., Сердюков Н.Д., Харламов В.О., Перенос продуктов износа абразивного материала при царапании и шлифовании титана // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 30–39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-30-39

Abrasive wear products transport during titanium scratching and abrasion

Vladimir A. Nosenko¹, D. Eng.
Semyon P. Kuznetsov², PhD Eng.
Nikita D. Serdyukov³, senior lecturer.
Valentin O. Kharlamov⁴, PhD Eng.

^{1, 2, 3} Volga Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia

⁴ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ vladim.nosenko2014@yandex.ru

² cemen1894@yandex.ru

³ serdyukov-nikita@mail.ru

⁴ harlamov_vo@mail.ru

Abstract. Buried abrasive tool wear products on the surface of critical titanium alloy products become a fatal defect that can significantly reduce the service life of the unit due to intense abrasive wear of the contacting surfaces and the formation of fatigue cracks. Using the example of single grain cutting, it is shown that as a result of micro-piercing of an abrasive material, metal transport to the contacting surfaces of the grain decreases and wear products are introduced into the treated surface. When grinding with tools made of superhard materials, the possibility of monitoring and controlling this process by X-ray spectral analysis is limited resulting from a significant error in determining small concentrations of light elements. In order to measure the parameters of the wear products transport of an abrasive material, a method based on the analysis of polished surfaces images obtained in backscattered electrons is proposed. Based on the results of the elemental analysis, the composition of the wear products and the measurement errors of the transfer parameters under grinding with silicon carbide and cubic boron nitride (CBN) wheels, namely the number and area of buried particles, were determined. The share of structured crystals of abrasive materials for silicon carbide wheels is 80 % and for CBN disks is 70 %, including 20 % corundum crystals (filler).

Keywords: titanium, silicon carbide, cubic boron nitride, micro-scratching, grinding, material transport, chemical composition

Financing: the research was carried out at the expense of the development program of VolgSTU «Priority 2030», as part of the scientific project No. 45/649-24

For citation: Nosenko V.A., Kuznetsov S.P., Serdyukov N.D., Kharlamov V.O. Abrasive wear products transport during titanium scratching and abrasion / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 30–39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-30-39

Введение

Шлифование – процесс микроцарапания обрабатываемого материала вершинами зёрен абразивного инструмента (АИ) [1, 2]. Важнейшим свойством АИ является самозатачиваемость – «свойство абразивного инструмента сохранять работоспособное состояние вследствие образования новых выступов и режущих кромок у абразивных зерен при абразивной обработке» (ГОСТ 21445). Образование новых режущих кромок снижает силу резания и температуру в зоне контакта, определяет производительность и стойкость шлифовальных кругов [3].

С увеличением размеров площадки износа возрастает сила, действующая на зерно, и внутренние растягивающие напряжения, при достижении которыми критических значений в материале образуются трещины, являющиеся причиной скалывания фрагментов зерна [4, 5].

Если самозатачиваемость зерна проявляется в меньшей степени, происходит разрушение связки и вырывание зёрен, в результате, снижается коэффициент шлифования, возрастает шероховатость обработанной поверхности [6].

Множество исследований процесса шлифования инструментом из кубического нитрида бора (КНБ) свидетельствуют о предпочтительности самозатачиваемости абразивного материала. Созданы и разрабатываются поликристаллические зерна кубического нитрида бора, обладающие регулируемой самозатачиваемостью. Из классических абразивных материалов большей склонностью к самозатачиванию обладают зерна карбида кремния, что во многом определяется высокой хрупкостью материала по сравнению, например, с корундом. С целью повышения самозатачиваемости разработаны поликристаллические материалы на основе корунда [7 – 9].

Образование продуктов износа абразивного материала происходит непосредственно в зоне контакта, что определяет вторую и менее изученную сторону самозатачивания: отделившиеся непосредственно в зоне резания фрагменты абразивного зерна способны внедряться в обрабатываемую поверхность. Кристаллы, внедренные на поверхность изделия, являются концентраторами напряжений, нарушают целостность поверхности и оказывают негативное влияние на эксплуатационные свойства. При работе изделий, особенно в условиях знакопеременных нагрузок, концентраторы напряжений снижают усталостную прочность материала и вносят непредсказуемость в показатели надежности, что имеет большое значение при эксплуатации ответственных изделий [10, 11]

Взаимоперенос материалов при шлифовании и других видах абразивной обработки во многом определяется адгезионной активностью обрабатываемого материала. Наибольшей адгезионной активностью в ряду *d*-переходных металлов IV периода обладает титан [12]. Поэтому при шлифовании титана и его сплавов инструментом из карбида кремния перенос продуктов износа абразивного инструмента в 5 – 8 раз больше, по сравнению, например, с железом, кобальтом и никелем. Внедрение продуктов износа инструментов из классических абразивных материалов в поверхность титановых сплавов является доказанным фактом [13, 14]. Интенсивность переноса абразивных инструментов из карбида кремния и корунда определяли по изменению концентрации, соответственно, кремния и алюминия [13].

При шлифовании инструментами из КНБ и алмаза достоверное определение концентрации бора, азота и углерода только в результате переноса из абразивного материала осложняется наличием указанных элементов в окружающей среде и методическими трудностями отделения пиков этих элементов от тормозного рентгеновского излучения [15]. В связи с этим, интенсивность переноса материала абразивных инструментов из алмаза и КНБ определяют в результате анализа изображения обработанной поверхности в обратно рассеянных электронах [16].

Как было отмечено ранее, удаление обрабатываемого материала при шлифовании

происходит в результате микроцарапания вершинами зёрен. Поэтому и перенос материалов при шлифовании следует рассматривать, как результат взаимодействия единичных вершин зёрен с обрабатываемым материалом. Тем не менее, шлифование отличается от царапания единичными зёрнами. К отличительным особенностям переноса материалов при шлифовании следует отнести присутствие на обработанной поверхности материала связи, в том числе, в сочетании с абразивным материалом [12], возможность изменения размера и положения ранее перенесённых продуктов износа в результате контакта с другими зёрнами абразивного инструмента, в том числе, на последующих проходах. Сравнительный анализ переноса материала при микроцарапании единичной вершиной зерна и шлифовании абразивным инструментом способствует более глубокому пониманию процесса.

Цель работы – исследование переноса абразивного материала на обработанную поверхность при микроцарапании инденторами и шлифовании абразивными инструментами из карбида кремния и кубического нитрида бора.

Методика исследований

В качестве обрабатываемого металла использовали технически чистый титановый сплав марки ВТ1-00 (ГОСТ 19807-91), не содержащий легирующих элементов, массовая доля титана более 99,6 %. Содержания кремния и углерода в титановом сплаве ВТ1-00 не более, соответственно, 0,08 и 0,05 %, содержание бора не указано (ГОСТ 19807-91). Выбор титанового сплава обусловлен высокой адгезионной активностью металла, минимальное содержание примесей в сплаве снижает точность определения концентрации химических элементов, входящих абразивных материалов. Царапание осуществляли инденторами из карбида кремния зеленого (далее – карбид кремния), производитель ОАО «Волжский абразивный завод» и кубического нитрида бора (КНБ), производитель АО «Абразивный завод «Ильич». Вершины кристаллов перед царапанием затачивали на заточном станке алмазным абразивным инструментом, угол конуса 120 °, радиус округления вершины 25...30 мкм.

Поверхности титанового сплава для микроцарапания подготавливали на прецизионном шлифовальном станке CHEVALIER с числовым программным управлением мод. Smart-B1224III [17]. Шероховатость поверхности образца Ra не превышала 0,2 мкм. После этого шлифовальный круг заменяли металлическим диском, в торцовой поверхности которого закрепляли индентор и ориентировали его перпендикулярно поверхности образца. С помощью шупа устанавливали зазор между индентором и поверхностью образца 4...50 мкм. Включали вращение шпинделя и ручную, управляя возвратно-поступательным поперечным (осевым) перемещением стола, одновременно опускали шпиндель станка и фиксировали начало появления царапин на поверхности титанового сплава. Касание вершины индентора с поверхностью заготовки определяли по дорожке царапин. Как показали эксперименты, глубина видимой дорожки царапин не превышала 2 мкм, скорость резания 35 м/с.

Профиль царапины измеряли профилометром SurfTest SJ-410. Морфологию царапин исследовали на двухлучевом растровом электронном микроскопе Versa 3D LoVac. Для определения кристаллов абразивных материалов, перенесенных на поверхность титанового сплава, изображение получали в обратно-рассеянных электронах. На поверхности титана внедренные объекты выделяются низким градиционным уровнем яркости. Средний атомный номер кубического нитрида бора – 6, карбида кремния – 10, титана – 22. Химический состав предполагаемых кристаллов абразивных материалов определяли методом рентгено-спектрального анализа.

Результаты исследования царапин сопоставляли с состоянием поверхности титанового сплава после шлифования абразивными инструментами из карбида кремния и кубического нитрида бора. Характеристики абразивных инструментов 54C F100 G 10V и CBN30 B126 M 100 % V. Тип и размер шлифовальных кругов – 1A1 300×15×127. Скорость шлифования соответствовала скорости микроцарапания; подача на глубину 0,005 мм/ход; продольная подача 12 м/мин. Поверхность образца подготавливали и шлифовали на том же станке.

Результаты, обсуждение результатов

Перенос кристаллов карбида кремния и КНБ при царапании

В результате исследования морфологии и размеров царапин на оптическом микроскопе показано, что на фоне плавного уменьшения длины царапин значительных изменений размеров не установлено. Тем не менее, в отдельных царапинах обнаружены инородные объекты. Морфологию царапин и внедренных объектов исследовали на электронном микроскопе (рис. 1). Направление резания справа налево.

При микроцарапании индентором из карбида кремния (рис. 1, а) слева от большого кристалла 1 образовался валик металла 2, что хорошо согласуется с направлением движения индентора. В результате перемещения возрастающего объема металла, увеличивается сила сопротивления движению индентора, что и явилось причиной скалывания данного фрагмента кристалла. Отдельные мелкие фрагменты кристаллов расположены справа по ходу движения 3. Размер видимой части продуктов износа от 1,0 до 40 мкм. На рис. 1, б показана группа кристаллов приблизительно одинакового размера и формы. Справа видна дорожка скольжения, оставленная данной группой кристаллов, слева валик металла, остановивший перемещение кристаллов. Размер кристаллов около 5 мкм.

Фрагменты кристаллов КНБ, вдавленные в поверхность царапины, показаны на рис. 1, в. Хорошо выраженные дорожки справа и слева от внедренных кристаллов свидетельствует о том, что отделившиеся кристаллы расположены не в первом ряду площадки износа по направлению её движения. Размер продуктов износа от 1,0 до 20 мкм. Кристаллы длиной 5...10 мкм показаны на рис. 1, г.

На основе анализа размеров кристаллов, вдавленных в поверхность царапин, установлено, что размеры продуктов износа абразивного материала после царапания индентором из КНБ почти в два раза меньше, по сравнению с продуктами износа инденторов из карбида кремния.

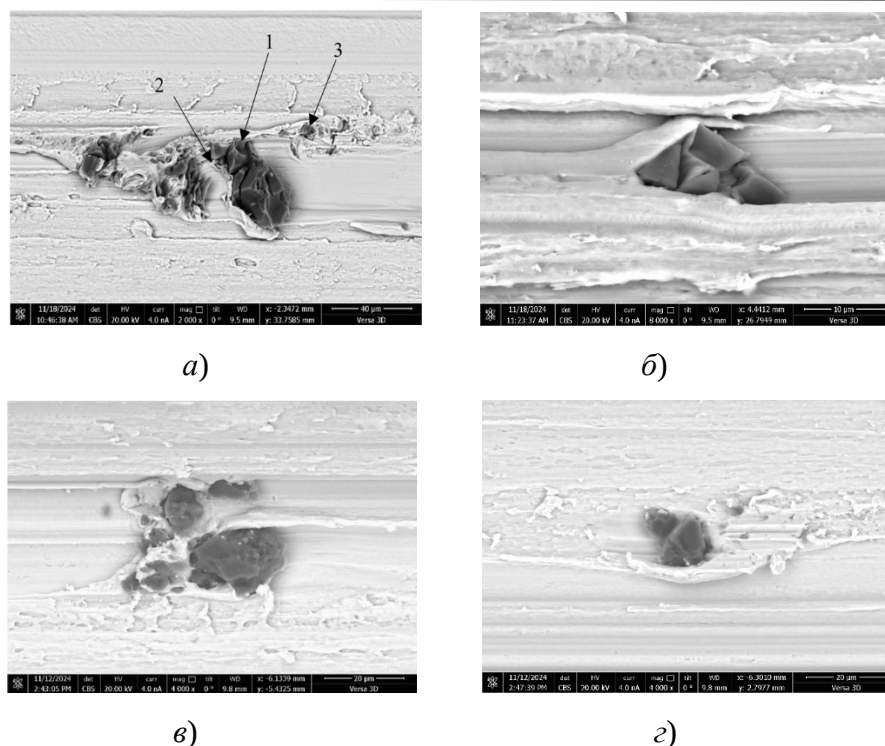


Рис. 1. Продукты износа, внедренные в поверхность титанового сплава после царапания инденторами из карбида кремния (а, б) и кубического нитрида бора (в, г)

Fig. 1. Wear products buried in the surface of a titanium alloy after scratching by indenters made of silicon carbide (a, b) and cubic boron nitride (c, d)

Спектрограмма объектов, обнаруженных на поверхности царапин после взаимодействия с вершиной индентора из карбида кремния (рис. 2, а), свидетельствует о наличии углерода и кремния, составляющих молекулу

карбида кремния. В спектрограмме объектов, присутствующих в царапинах, образованных индентором из КНБ, основными химическими элементами являются азот и бор (рис. 2, б). В каждой спектрограмме присутствует титан.

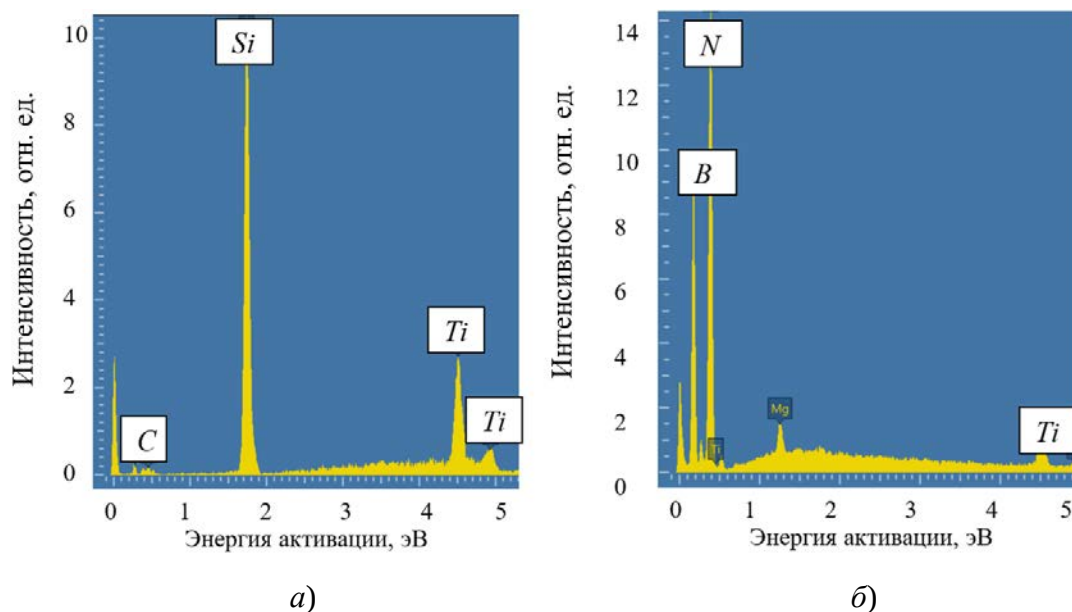


Рис. 2. Типовая спектрограмма объектов после царапания кристаллами из карбида кремния (а) и КНБ (б)

Fig. 2. Typical spectrogram of objects after scratching by crystals made of silicon carbide (a) and CBN (b)

Для наглядного представления о химическом составе внедренных объектов, интенсивность пика линий представлена в атомных долях (табл. 1). В карбиде кремния содержание атомов углерода в два раза превышает содержание атомов кремния. Установлено, что с увеличением энергии активации различие в атомных концентрациях кремния и углерода снижается [18]. Учитывая, что с увеличением энергии активации глубина зоны генерации рентгеновского характеристического излучения возрастает, соответственно, информация о содержании химических элементов усредняется в большем объеме анализируемого материала. В

результате различия в атомарных концентрациях кремния и углерода, обусловленные повышенной концентрацией углерода на поверхности кристалла с увеличением энергии активации снижаются. В составе КНБ присутствует магний, выступающий инициатором превращения гексагонального нитрида бора в кубическую модификацию [19].

Полученный в результате количественного анализа химический состав исследуемых объектов (табл. 1), позволяет идентифицировать объекты, как внедренные продукты износа карбида кремния и КНБ.

1. Химический состав объектов

1. Chemical composition of objects

SiC			КНБ		
Химический элемент	Атомная доля, %, (рис. 1, а)	Атомная доля, % (рис. 1, б)	Химический элемент	Атомная доля, %, (рис. 1, в)	Атомная доля, % (рис. 1, б)
C	67,94	67,54	B	50,90	52,23
Si	31,81	27,29	N	48,69	47,50
O	–	3,11	Mg	0,20	–
Ti	0,25	2,06	Ti	0,22	0,27
Total	100,00	100,00	Total	100,00	100,00

Перенос материала при шлифовании

Продуктами износа абразивного инструмента при шлифовании являются кристаллы абразивных материалов, фрагменты связки и кристаллы абразивного материала со связкой. Инструменты из сверхтвёрдых материалов в своем составе содержат наполнители. В частности, используемые инструменты из КНБ в качестве наполнителя содержат шлифовальные порошки из электрокорунда. Поэтому в продуктах износа могут появиться кристаллы корунда в различном сочетании. Уровень яркости перечисленных объектов отличается несущественно, что не позволяет классифицировать на шлифованной поверхности по данному критерию. Перечисленные объекты объединены в одну группу.

На рис. 3 представлены 54 объекта, выделенные на шлифованной поверхности титанового сплава ВТ1-00 после шлифования абразивным инструментом из кубического нитрида бора. Последующее разделение выделенных объектов осуществляли методом рентгено-спектрального анализа, по результатам

которого выделены 4 группы: КНБ, корунд, связка и элементы рельефа шлифованной поверхности. На рис. 4, а приведена спектрограмма характеристического рентгеновского излучения частицы КНБ (объект 2 на рис. 3). Идентификацию подобных объектов делали по наличию пиков *B*, *N* и *Ti*. К данной группе отнесено 34 объекта, что составляет 65 % от общего количества.

Спектрограмма корунда дана на примере объекта 4 (рис. 4, б), где присутствуют два пика основных химических элементов: *Al* и *O*. Атомная концентрация элементов близка к пропорции 2:3 (табл. 2). В принадлежности к корунду идентифицированы 10 объектов, что составляет 19 % от общего числа предполагаемых продуктов износа. В отличие от корунда и нитрида бора в состав связки входит множество компонентов (рис. 4, в, г). Характерным набором элементов являются алюминий, кислород, углерод, магний, кальций, калий и натрий [20]. К связке отнесены пять объектов, что составляет около 9 % от общего числа выделенных предполагаемых продуктов износа.

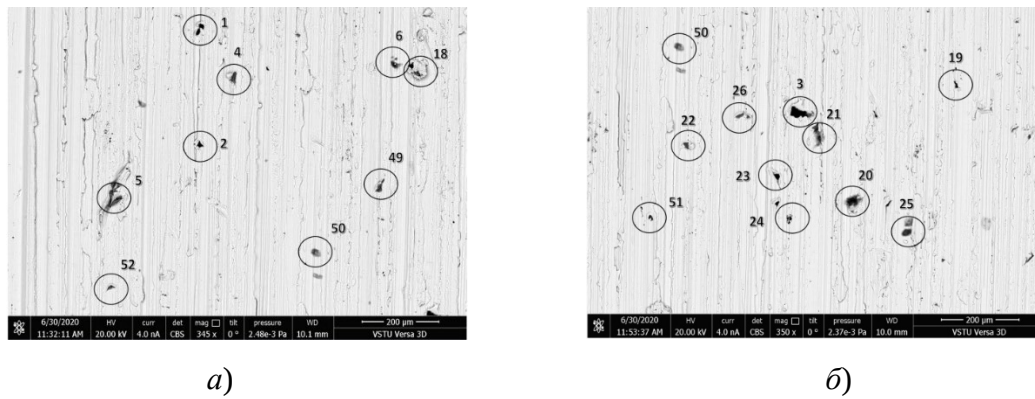


Рис. 3. Поверхность титана после шлифования кругом из КНБ с выделенными объектами
Fig. 3. Titanium surface after grinding with a CBN wheel for selected objects

В результате исследований выделена ещё одна группа – элементы рельефа обработанной поверхности. Рентгенограмма этой группы не имеет интенсивных пиков химических элементов, за исключением титана и отличается повышенным фоном (рис. 4, д). Элементный состав таких объектов определен со значительной погрешностью (табл. 2,

объект 19). К элементам рельефа отнесены объекты 19, 31, 37 и 53, что составляет около 7 % от общего количества. Площадь указанных объектов не превышает 2 % от суммарной площади выделенных 54 объектов. Суммарная площадь продуктов износа, внедренных в обработанную поверхность, составляет менее 0,01 %.

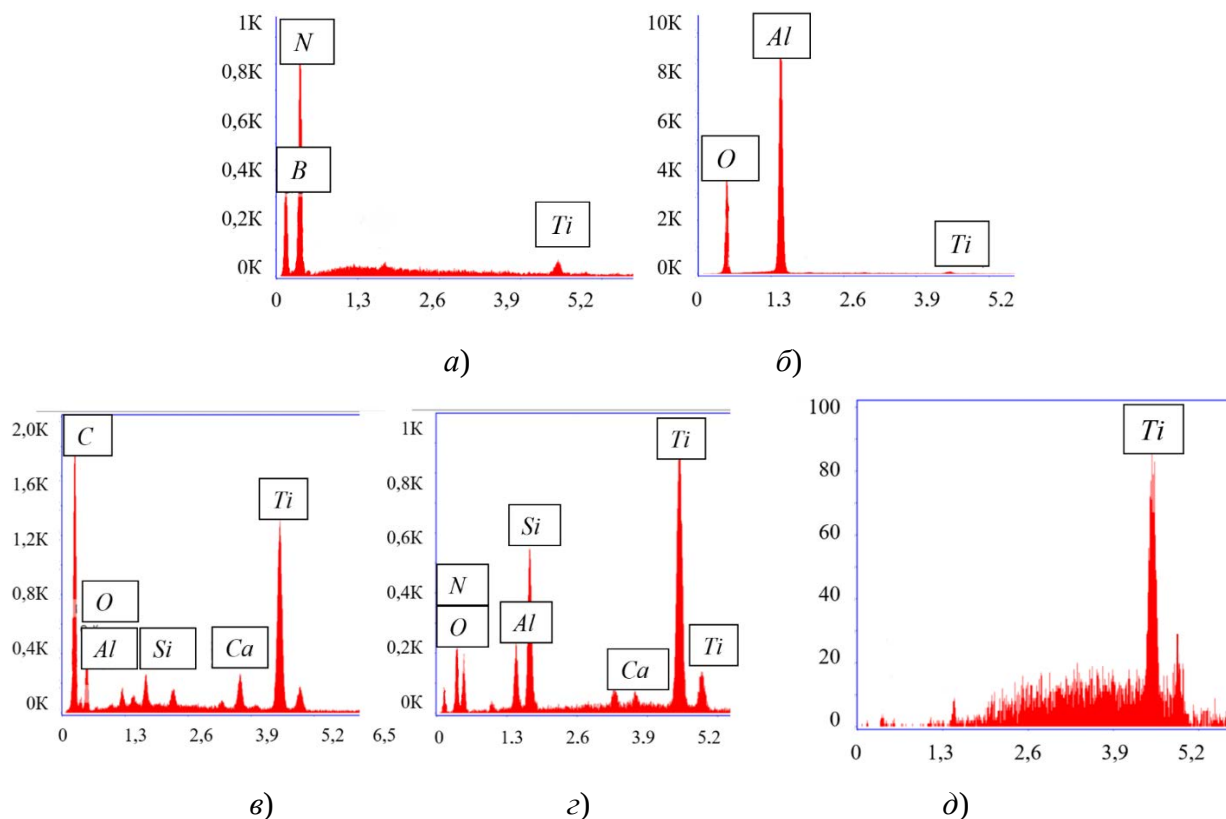


Рис. 4. Типовые спектрограммы объектов с низким градиционным уровнем яркости:
а – КНБ; б – корунд; в, г – связка; д – элементы рельефа

Fig. 4. Typical spectrograms of objects with low brightness gradation:
а – CBN; б – corundum; в, г – bundle; д – relief elements

2. Химический состав объектов (рис. 3), атомные доли

2. Chemical composition of objects (Fig. 3), atomic fractions

Элемент	Объект 2, %	Объект 4, %	Объект 19, %	Объект 20, %	Объект 25, %
B	44,1	5,4	21,1	20,5	41,1
C	2,7	1,1	1,1	57,3	1
N	51,8	-	10,9	6,6	23,9
O	1,1	58,4	12,8	9,5	18,6
Na	-	-	-	1,2	1,4
Al	-	34,7	1,2	-	1,5
Si	-	-	-	-	3,6
Ca	-	-	-	1,3	-
Ti	-	-	52,8	2,8	7,7

При шлифовании кругом из карбида кремния выделено 70 объектов. Результаты рентгеноспектрального анализа представлены на рис. 6. На основании полученных рентгенограмм объекты разделены на три группы: элементы рельефа (рис. 5, а), карбид кремния (рис. 5, б) и фрагменты связки (рис. 5, в).

К элементам рельефа отнесены 24 объекта (34 %), карбид кремния – 37 объектов (53 %), керамическая связка – 9 объектов (13 %).

Суммарная площадь выделенных объектов 2207 мкм², на объекты, идентифицированные как элементы рельефа, приходится 130 мкм², что составляет 6 % от общей площади.

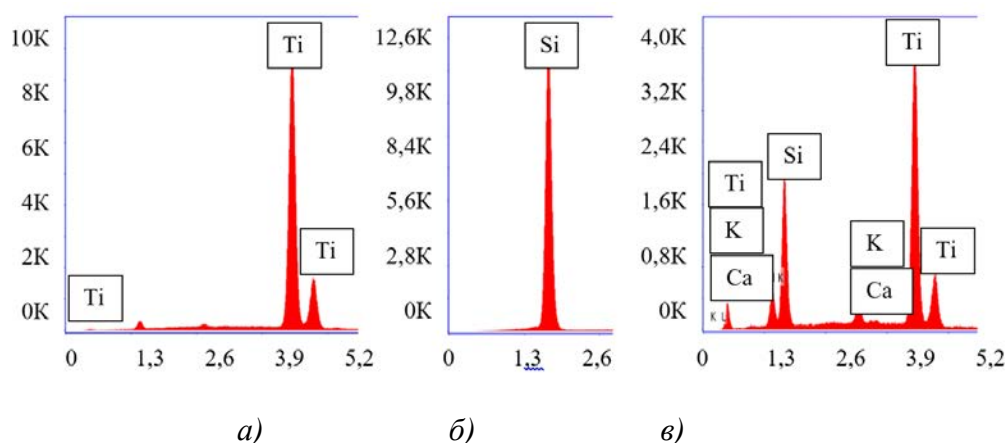


Рис. 5. Типовые спектрограммы объектов с низким градационным уровнем яркости:
а – элементы рельефа; б – карбид кремния; в – связка

Fig. 5. Typical spectrograms of objects with low radiation brightness:
a – relief elements; b – silicon carbide; c – a bundle

Выводы

Подтверждено, что при микроцарапании титана инденторами из КНБ и карбида кремния происходит перенос продуктов износа в поверхность царапины. Рентгеноспектральным анализом определен химический состав продуктов износа.

Установлено, что максимальные размеры кристаллов из карбида кремния,

внедренных в поверхность царапины, почти в два раза превосходят максимальный размер кристаллов из кубического нитрида бора.

На основе рентгеноспектрального микроанализа дана классификация продуктов износа абразивных инструментов, внедренных в обработанную поверхность титанового сплава при шлифовании инструментами из карбида кремния и кубического нитрида бора: абразивный материал (карбид кремния или кубический

нитрид бора), связка, наполнитель (зерна корунда в инструменте из кубического нитрида бора). Кроме перечисленных рентгеноспектральный анализ определил некоторые выделенные объекты, как ложные, выделение которых обусловлено рельефом поверхности.

Определена доля перечисленных объектов в общем количестве объектов, выделенных методом бинаризации изображения поверхности в обратно рассеянных электронах. При шлифовании абразивными инструментами из кубического нитрида бора / карбида кремния: основной абразивный материал – 65 % / 53 %, наполнитель (корунд) – 19 % / 0 %; связка – 9 % / 20 %, ложные объекты – 7 % / 34 %. Большое количество ложных выделенных продуктов износа при шлифовании инструментом из карбида кремния обусловлено меньшей разницей градиционных уровней яркости между карбидом кремния и элементами рельефа по сравнению с кубическим нитридом бора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник** технолога / Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Базров Б.М. [и др.]; общ. ред. Суслов А. Г. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 799 с.: ил. ISBN 978-5-907104-23-5.
2. **Malkin S.** Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, 1989. 275 p. ISBN 0-85312-756-5
3. **Ichida Y.** Formation Mechanism of Grain Cutting Edges in Micro Dressing of Polycrystalline cBN Grinding Wheels // *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 523. P. 137–142. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.137.
4. **Zhao Z., Fu Y., Xu J., Zhang Z.** Behavior and quantitative characterization of CBN wheel wear in high-speed grinding of nickel-based superalloy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. P. 3545–3555. DOI: 10.1007/s00170-016-8686-1
5. **Лобанов Д. В., Секлетина Л.С., Янюшкин А.Р.** Комбинированная электроалмазная обработка алмазными кругами на металлической связке // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2019. Т. 6, № 1 – 4. С. 110–116. EDN XCMUJX.
6. **Ghosh A., Chattopadhyay A.K.** On grit-failure of an indigenously developed single layer brazed CBN wheel // *Industrial Diamond Review*. 2007. Vol. 67. P. 59–64.
7. **Zhu Y., Ding W., Rao Z., Zhao Z.** Self-sharpening ability of monolayer brazed polycrystalline CBN grinding wheel during high-speed grinding // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. P. 24078–24089. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.08.115
8. **Huang, X., Li H.N., Rao Z., Ding W.** Fracture behavior and self-sharpening mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride in grinding based on cohesive element method // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2018. Vol. 32. P. 2727–2742. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.004
9. **Mohan R., Ramachandran D.** A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10. P. 965–974.
10. **Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors / R.X. Wang, K. Zhou, J.Y. Yang, H. Ding, W. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu // Wear. 2020. DOI:203332. 10.1016/j.wear.2020.203332.**
11. **Boud F., Carpenter C., Folkes J., Shipway P.** Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality // *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*. 2010. Vol. 210. P. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.
12. **Носенко В.А., Фетисов А.В., Сердюков Н.Д.** Морфология и химический состав поверхности титанового сплава после шлифования кругом из карбида кремния // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2019. № 12 (102). С. 22–28.
13. **Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В., Харламов В.О.** Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2017. № 10 (76). С. 9–18.
14. **Xu X., Yu Y., Huang H.** Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // *Wear*. 2003. Vol. 255. P. 1421–1426. DOI:
15. **Аналитическая** просвечивающая электронная микроскопия / Синдо Д., Оикава Т. М.: Техносфера, 2006. 256 с. ISBN: 5-94836-064-4.
16. **Пат. 2768518 РФ, МПК G01N 19/08 [и др.]** Способ определения степени шаржирования металлических поверхностей абразивными зёрнами из сверхтвёрдых абразивных материалов / В.А. Носенко, С.П. Кузнецов, Н.Д. Сердюков; ФГБОУ ВО ВолГТУ. - 2022.
17. **Носенко В.А., Белухин Р.А., Фетисов А.В., Морозова Л.К.** Испытательный комплекс на базе прецизионного профилировального станка с ЧПУ CHEVALIER модели SMART-B1224 III // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2016. № 5 (184). – С. 35–39. EDN: VYWZTN.
18. **Носенко В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И.** Рентгеноспектральный микроанализ поверхности карбида кремния после микроцарапания титана // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15, № 1. С. 69–79. EDN TGRQLF.
19. **Волков Г.Н., Гаршин А.П.** Сравнительные показатели абразивных порошков из кубического нитрида бора // *Новые огнеупоры*. 2020. №8. С. 31–40. ISSN 1683-4518 <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-8-31-40>.
20. **Sun X., Yu T., Chen Y., Zhang C., Ma Z.** Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites, // *Ceramics International*. 2019. Vol. 46. P. 5337–5343. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.10.286.

REFERENCES

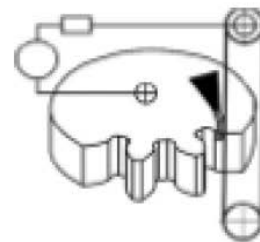
1. The technologist's handbook/under the general editorship of Suslov, A.G. Bezlyazny V.F., Bazrov B.M. [et al.]; Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2019, 799 p.: ill. ISBN 978-5-907104-23-5.
2. Malkin S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, 1989. 275 p. ISBN 0-85312-756-5
3. Ichida Y. Formation Mechanism of Grain Cutting Edges in Micro Dressing of Polycrystalline cBN Grinding Wheels // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 523. P. 137–142. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.137.
4. Zhao Z., Fu Y., Xu J., Zhang Z. Behavior and quantitative characterization of CBN wheel wear in highspeed grinding of nickel-based superalloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 87. P. 3545–3555. DOI: 10.1007/s00170-016-8686-1
5. Lobanov D. V., Sekletina L.S., Yanushkin A.R. Combined electrodiamond processing with diamond wheels on a metal bond // Actual problems in mechanical engineering, 2019, vol. 6, No. 1-4. pp. 110–116. EDN XCMUJX.
6. Ghosh A., Chattopadhyay A.K. On grit-failure of an indigenously developed single layer brazed CBN wheel // Industrial Diamond Review. 2007. Vol. 67. P. 59–64.
7. Zhu Y., Ding W., Rao Z., Zhao Z. Self-sharpening ability of monolayer brazed polycrystalline CBN grinding wheel during high-speed grinding // Ceramics International. 2019. Vol. 45. P. 24078–24089. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.08.115
8. Huang, X., LI H.N., Rao Z., Ding W. Fracture behavior and self-sharpening mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride in grinding based on cohesive element method // Chinese Journal of Aeronautics. 2018. Vol. 32. P. 2727–2742. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.004
9. Mohan R, Ramachandran D. A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. P. 965–974.
10. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors / R.X. Wang, K. Zhou, J.Y. Yang, H. Ding, W. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu // Wear. 2020. DOI:203332. 10.1016/j.wear.2020.203332.
11. Boud F., Carpenter C., Folkes J., Shipway P. Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality // Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL. 2010. Vol. 210. P. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006.
12. Nosenko V.A., Fetisov A.V., Serdyukov N.D. Morphology and chemical composition of titanium alloy surface after grinding with silicon carbide disk. // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 12 (102), pp. 22–28.
13. Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V., Kharlamov V.O. Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2017, no. 10 (76), pp. 9–18.
14. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. 2003. Vol. 255. P. 1421–1426. DOI:
15. Analytical transmission electron microscopy / Shindo D., Oikawa T. M.: Technosphere, 2006, 256 p. ISBN: 5-94836-064-4.
16. Pat. 2768518 of the Russian Federation, IPC G01N 19/08 [et al] A method for determining the degree of caricature of metal surfaces with abrasive grains from superhard abrasive materials / V.A. Nosenko, S.P. Kuznetsov, N.D. Serdyukov; FSBEI VO VolgSTU. 2022.
17. Nosenko V.A., Belukhin R.A., Fetisov A.V., Morozova L.K. A test complex based on a precision CNC profile grinding machine CHEVALIER model SMART-B1224 III // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2016, no. 5 (184). pp. 35–39. EDN: VYWZTN.
18. Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakmat V.I. X-ray spectral microanalysis of the silicon carbide surface after micro-scratching of titanium // Bulletin of the South Ural State University. Issue: Mechanical engineering, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 69–79. EDN TGRQLF
19. Volkov G.N., Garshin A.P. Comparative indicators of abrasive powders of cubic boron nitride of different grades // Novie ognepori, 2020, no. 8, pp. 31–40. ISSN 1683-4518 <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-8-31-40>.
20. Sun X., Yu T., Chen Y., Zhang C., Ma Z. Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites, // Ceramics International. 2019. Vol. 46. P. 5337–5343. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.10.286.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.12.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 24.12.2024.

The article was submitted 13.12.2024; approved after reviewing 16.12.2024; assepted for publication 24.12.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.923.04
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-40-48

Проблемы и решения обработки новых композиционных материалов на основе диборида циркония электроалмазными методами

Андрей Романович Янюшкин¹, аспирант
Дмитрий Владимирович Лобанов², д.т.н.
Александр Сергеевич Янюшкин³, д.т.н.
Владимир Владимирович Скрипняк⁴, к.ф.-м.н.
Владимир Альбертович Скрипняк⁵, д.ф.-м.н.

^{1, 2, 3} Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

^{4, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ andreyyayushkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>

² lobanovdv@list.ru <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>

³ yanyushkinas@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

⁴ skrp@ftf.tsu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2238-5856>

⁵ skrp2012@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-7162-3983>

Аннотация. Рассмотрены проблемные вопросы, связанные с разработкой, обрабатываемостью и областью применения новых высокопрочных керамических материалов. Эти материалы обладают высокой твердостью, соизмеримой с твердостью абразивных материалов. Поэтому изготовление изделий из таких материалов по традиционным технологиям затруднительно, а в ряде случаев просто невозможно. Для решения этой проблемы предложена модернизация станка модели PP600F с реализацией комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных керамических материалов алмазными кругами на металлической связке. Модернизация предусматривает разработку специальных узлов и конструкций токосъемника, катода для правки круга, схемы источника технологического тока и конструктивных решений автоматического управления током правки. На основе результатов исследования установлены рациональные режимы резания, гарантирующие качество изделий из высокопрочных композиционных материалов. Эксперименты выполнены по стандартным методикам с использованием оптической и электронной микроскопии. Поставленные задачи решены с учетом исследования удельного расхода алмазных кругов на металлической связке, сил, мощности, температуры резания, дефектов на поверхности шлифовального круга и обрабатываемого изделия. Показано решение управления режущей способностью шлифовального круга и условия их работы в режиме самозатачивания. На основе стабилизации мощности резания установлен режим самозатачивания алмазных кругов на металлической связке и режимы шлифования: $v_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 0,5...1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,02...0,05$ мм/дв.ход; $i_{пр} = 0,2...0,6$ А/см²; $i_{пр} = 4...6$ А/см². На примере шлифования диборида циркония алмазным кругом АС6 с зернистостью 125/100 на этих режимах гарантирует отсутствие микро, макротрещин, шероховатость обработанной поверхности в пределах 0,2...0,4 мкм.

Ключевые слова: алмазные круги, шлифование, комбинированная обработка, управление процессом правки, качество, модернизация, высокопрочные керамические материалы

Для цитирования: Янющкин А.Р., Лобанов Д.В., Янющкини А.С., Скрипняк В.В., Скрипняк В.А. Проблемы и решения обработки новых композиционных материалов на основе диборида циркония электроалмазными методами // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-40-48

Problems and solutions of composite machining by electro-diamond methods for materials based on zirconium diboride

Andrey R. Yanushkin¹, PhD student

Dmitry V. Lobanov², D. Eng.

Alexander S. Yanushkin³, D. Eng.

Vladimir V. Skripnyak⁴, Cand.Sc.

Vladimir A. Skripnyak⁵, Dr.Sci in Physics and Maths,

^{1, 2, 3} I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

^{4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ andreyayushkin@mail.ru

² lobanovdv@list.ru

³ yanyushkinas@mail.ru

⁴ skrp@ftf.tsu.ru

⁵ skrp2012@yandex.ru

Abstract. Problematic issues related to the development, machinability and application of new high-strength ceramic materials are viewed. Such materials possess high hardness comparable to the hardness of abrasive materials. Therefore, it makes difficult to produce such materials using traditional techniques. To solve this problem, we have proposed the modernization of the PP 600F machine with the implementation of combined electro-diamond processing of high-strength ceramic materials with diamond wheels on a binder metal. The modernization provides for the development of special components and structures of a current collector, a cathode for straightening a circle, a circuit for a technological current source and constructive solutions for automatic control of the straightening current. Based on the results of the study, rational cutting modes have been established to guarantee the quality of products made of high-strength composite materials. The experiments were performed with standard techniques using optical and electron microscopy. The tasks were solved taking into account the study of diamond wheels flow density on a metallic binder, as well as forces, power, cutting temperature, defects on the surface of the grinding wheel and the machined product. The solution for controlling the cutting capacity of a grinding wheel and the conditions of their operation in the self-sharpening mode is shown. Based on the stabilization of cutting power, the self-sharpening mode of diamond wheels on a metallic binder and grinding modes are switched on: $v_{gwh} = 35 \text{ m/s}$; $S_{pr} = 0.5 \dots 1.5 \text{ m/min}$; $S_{np} = 0.5 \dots 1.5 \text{ м/мин}$; $S_{non} = 0.02 \dots 0.05 \text{ mm/dv.stroke}$ $i_{np} = 0.2 \dots 0.6 \text{ A/cm}^2$; $i_{mp} = 4 \dots 6 \text{ A/cm}^2$. Using the example of grinding zirconium diboride with an AC6 diamond wheel with a grain size of 125/100 in these modes, it guarantees the absence of micro, macro cracks, and the roughness of the machined surface within $0.2 \dots 0.4 \text{ microns}$.

Keywords: diamond wheels, grinding, combined machining, control of the truing, quality, modernization, high-strength ceramic materials.

For citation: Yanushkin A.R., Lobanov D.V., Yanushkin A.S., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Problems and solutions of composite machining by electro-diamond methods for materials based on zirconium diboride / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-40-48

Введение

Диборид циркония ZrB_2 уникальный высокопрочный керамический материал. Основная область его применения: детали в химической, ракетной, космической отрасли и высокотемпературных узлах различной техники. Температура его плавления выше 3000°C , устойчив к окислению, имеет значительную химическую стойкость в агрессивных средах.

Поэтому может использоваться для создания защитных слоев на ответственных деталях машиностроения, а также при проектировании режущих инструментов на операциях механической обработки закаленных труднообрабатываемых и жаропрочных сталей [1 – 5]. Однако, несмотря на его высокую твердость, износостойкость, тепло и электропроводность, для инструментального материала он очень хрупкий. Единственным недостатком,

приемлемых режущих свойств, является недостаточная прочность. Поэтому на операциях восстановления режущих свойств, как лезвийного инструмента, использовать его проблематично, практически невозможно создать режущую кромку, которая разрушается при затачивании и шлифовании.

Для решения этой проблемы диборид циркония необходимо армировать, с целью увеличения его прочности, упрочненными частицами боридов, карбидами различных металлов или волокнами тугоплавких материалов, или как-то иначе.

Целью данных исследований, является продолжение изучения свойств композитов на основе диборида циркония, результаты которых представлены в работах [6, 7], а также изыскание приемлемых условий обрабатываемости новых высокопрочных композиционных материалов и установления рациональных режимов шлифования комбинированными электроалмазными методами с использованием алмазных кругов на металлической связке [8 – 11].

Исследования выполнены на примере электропроводящей ZrB_2 керамики с учётом минимального расхода алмазного круга, температуры, сил резания, мощности, образования микро макротрещин и шероховатости обработанной поверхности.

Материалы и оборудование

Обрабатываемость новых высокопрочных композиционных материалов механическим образом с применением лезвийного инструмента невозможна, а на операциях шлифования параметры обработки недостаточно изучены. Образцы диборид-циркониевой керамики показаны на рис. 1.

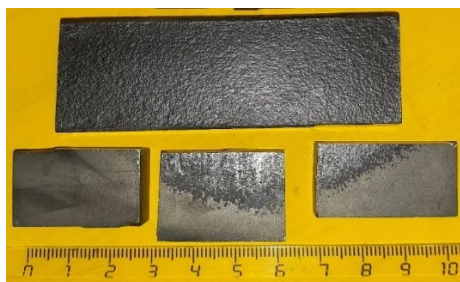


Рис. 1. Образцы диборид-циркониевой керамики

Fig. 1. Samples of diboride-zirconium ceramics

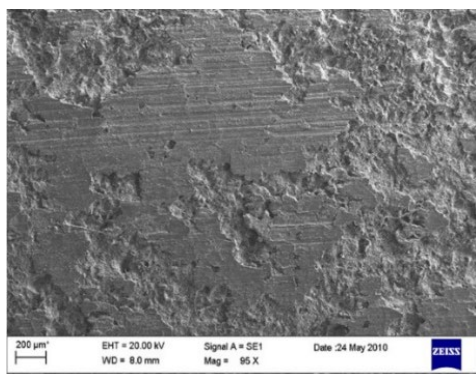
Для решения обозначенных проблем наиболее перспективны технологии на основе электрофизических методов обработки [12 – 14]. Одним из таких методов рекомендуется комбинированная электроалмазная обработка алмазными кругами на металлической связке с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга [15]. Но для этого требуется создание новых видов станков или существенная модернизация станков на базе существующего оборудования. Кафедра технологии машиностроения располагает достаточным опытом по модернизации различного вида оборудования шлифовально-заточной группы. В более ранних работах имеются сведения о множественных вариантах модернизации различных моделей станков под процессы комбинированной электроалмазной обработки, например: 3Д642Е, 3Е624, 3Г711 и др. В рамках данной статьи особое внимание уделяется информации по модернизации станка модели РР600F. Далее показаны отдельные фрагменты, связанные с качеством обработанной поверхности и модернизацией необходимых узлов и оснастки оборудования для шлифования различных высокопрочных композиционных материалов.

Результаты и обсуждения

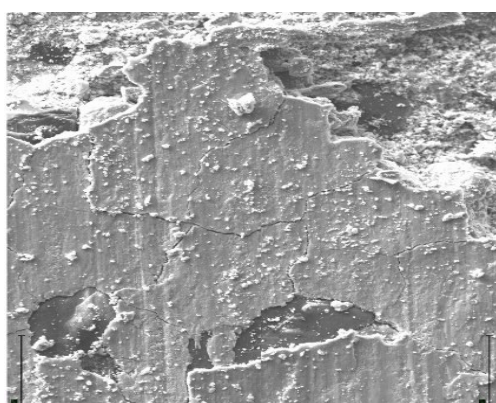
Поверхность алмазного круга АС6 125/100 М1 – 100 % после обычного шлифования показана на рис. 2. На рис. 2, а представлена обычная фотография, свидетельствующая о невозможности нормальной работы при шлифовании и поверхность этого же круга в отдельных точках при большом увеличении на растровом электронном микроскопе. На рис. 2, б видно, что рабочая поверхность алмазного круга не имеет режущих зерен, а те зерна, которые просматриваются, находятся ниже алмазоносного слоя и в работе не участвуют (рис. 2, в). Процесс резания в таких условиях сопровождается трением, высокими температурами и пластической деформацией на поверхности, как самого шлифовального круга, так и на поверхности обрабатываемого изделия.



a)



b)



в)

Рис. 2. Поверхность алмазного круга после обычного шлифования:

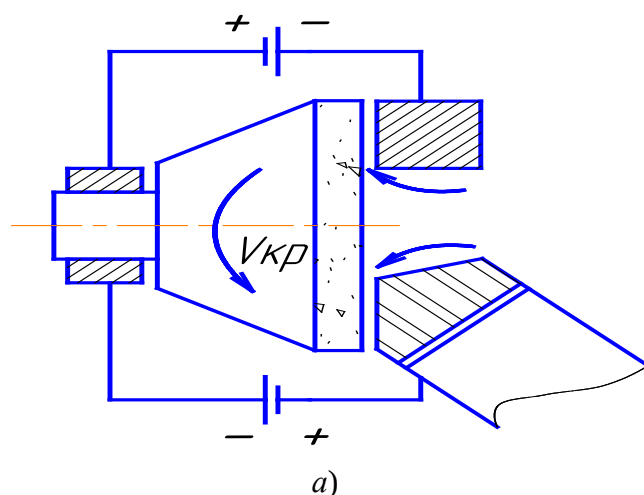
a – общий вид поверхности круга после обычного шлифования; б, в – вид поверхности алмазного круга при большом увеличении

Fig. 2. Surface of the diamond wheel after conventional grinding:

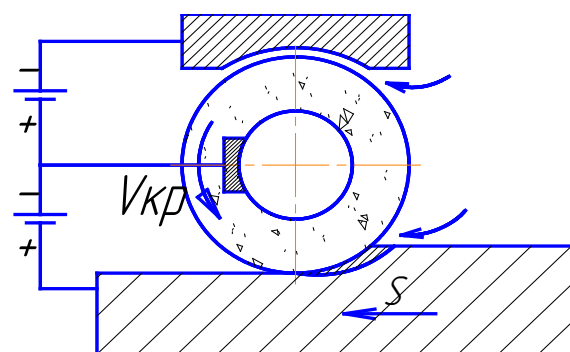
a – general view of the surface of the wheel after regular grinding; b, c – view of the surface of the diamond wheel at high magnification

Таким образом, всегда на операциях шлифования для эффективной работы требуется поддерживать режущие свойства шлифовального круга. Лучше будут условия, при которых шлифовальный круг работает с постоянными режущими свойствами в режиме самозатачивания. Для решения поставленной задачи предлагается один из вариантов шлифования алмазными кругами на металлической связке в

режиме самозатачивания с непрерывной электрохимической правкой круга. Варианты исполнения этих схем описаны в работе [15]. На рис. 3 показана принципиальная электрическая схема комбинированной электроалмазной обработки. Представленная схема обеспечивает работу алмазного круга в режиме самозатачивания с минимальными силами резания.



a)



б)

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема комбинированной электроалмазной обработки:

a – шлифование торцом алмазного круга; б – шлифование периферией алмазного круга

Fig. 3. Schematic electrical diagram of combined electro-diamond processing:

a – diamond disk grinding; b – peripheral grinding

Общий вид станка модели PP600F, на котором решены обозначенные проблемы показан на рис. 4. На станке дополнительно установлены токосъемник, катод для непрерывной правки круга, источник технологического тока, специальная оснастка.

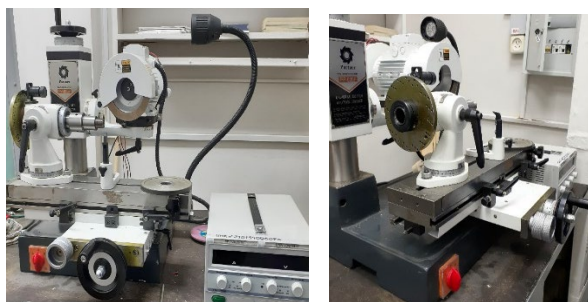


Рис. 4. Общий вид станка модели PP600F, используемый для шлифования комбинированным электроалмазным методом

Fig. 4. General view of the PP600F machine used for grinding with the combined electro-diamond method

Токосъемник установлен на шпинделе станка, вне рабочей зоне, представляет устройство, в котором расположены три подпружиненные графитовые щетки (рис. 5, а). К корпусу графитовых щеток от источника технологического тока подключен электрический провод, второй провод крепится на рабочем столе станка. Для исключения короткого замыкания корпус станка изолирован специальными прокладками между токосъемником и катодом для правки алмазного круга (рис. 5, а, б). Также станок дополнительно оснащен необходимыми приспособлениями (тиски, патроны, центра, универсальные головки и др. устройства).

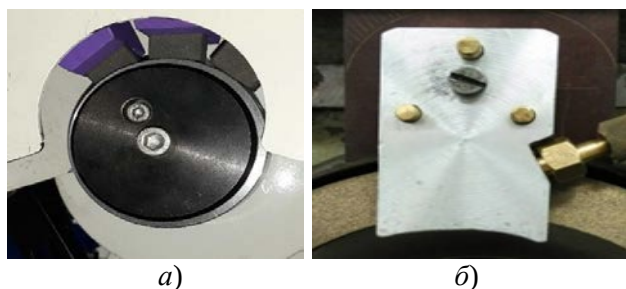


Рис. 5. Конструктивное исполнение узлов с токосъемником (а) и катодом для правки алмазного круга (б)

Fig. 5. Structural design of nodes with a current collector (a) and a cathode for a diamond wheel truing (b)

Со стороны рабочей зоны, на защитном кожухе алмазного круга закреплен правящий катод, через внутренние полости которого подается электролит. Таким образом осуществляется непрерывная правка алмазного слоя круга и обеспечивается его работа в режиме самозатачивания (рис. 5, б).

На рис. 6 показаны блоки реализации

предложенных электрических схем комбинированной электроалмазной обработки с одновременной правкой алмазного круга. Источник тока (рис. 6, а) кроме промышленной частоты 50 Гц, позволяет также работать в импульсном режиме на других частотах, $10^{-3} \dots 10^{-7}$ Гц. Возможно проектирование и других источников технологического тока.



а)



б)

Рис. 6. Источники технологического тока:

а – для травления обрабатываемой поверхности;
б – для правки алмазного круга

Fig. 6. Machining current sources:

а – for machined surface etching; б – for a diamond wheel truing

Представленная на рис. 7 электрическая схема, позволяет автоматически стабилизировать заданную величину тока в цепи правки и при необходимости изменять ее в зависимости от условий резания. Принцип работы схемы следующий. При потере режущих свойств алмазный круг теряет работоспособность и, как следствие, мощность резания возрастает, в результате чего повышается сила тока на фазах электропривода. При достижении мощности и сил резания критического значения, включается блок управления в цепи правки, происходит анодное растворение связки и засаленного слоя шлифовального круга, мощность резания снижается, а режущие свойства стабилизируются. В этом случае круг работает в режиме самозатачивания, происходит обновление абразивных зерен [16].

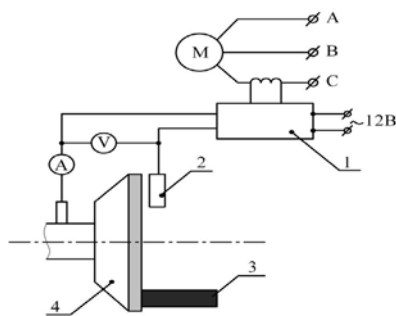


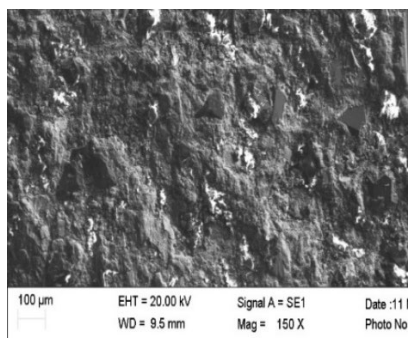
Рис. 7. Схема автоматического управления процессом непрерывной правки алмазного круга на металлической связке:

1 – блок управления; 2 – катод; 3 – деталь; 4 – алмазный круг

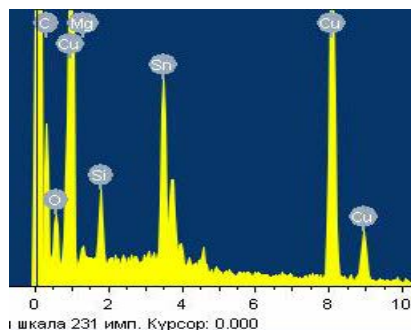
Fig. 7. Scheme of automatic control of the process of continuous truing of a diamond wheel on a metallic binder:

1 – control unit; 2 – cathode; 3 – part; 4 – diamond wheel

Поверхность алмазного круга на металлической связке после правки представлена на рис. 8. На ней виден развитый рельеф алмазного слоя с множественным количеством алмазных зерен с хорошими режущими свойствами (рис. 8, а) и спектр этой поверхности на котором отражены элементы связки круга с алмазными зернами (рис. 8, б).



а)



б)

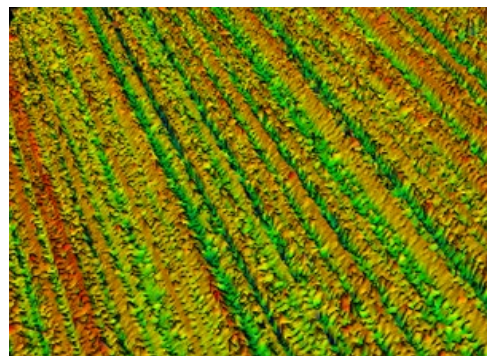
Рис. 8. Поверхность алмазного круга после правки:

а – рельеф поверхности круга; б – спектр поверхности круга

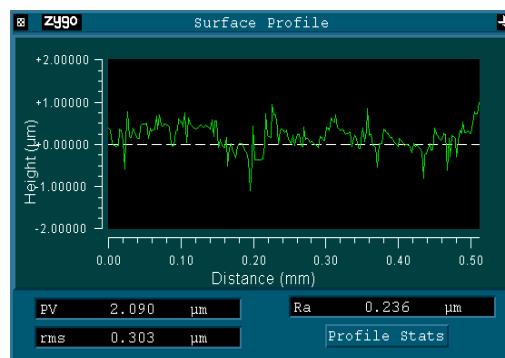
Fig. 8. The surface of the diamond wheel after truing:

а – the relief of the wheel surface; б – the spectrum of the wheel surface

Обработанная поверхность композиционного материала после шлифования комбинированным электроалмазным методом на рациональных режимах резания представлена на рис. 9. Экспериментами установлено, что шероховатость обработанной поверхности алмазными кругами на металлической связке с зернистостью 125/100 находится в пределах 0,2...0,4 мкм (рис. 9, б), что вполне приемлемо для большинства деталей машиностроения.



а)



б)

Рис. 9. Обработанная поверхность кругом AC6 125/100 M1 – 100 % концентрации при комбинированном электроалмазном шлифовании:

$v_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,05$ мм/дв.ход; $i_{пр} = 0,6$ А/см²; $i_{тр} = 4$ А/см²

Fig. 9. The machined surface using the AC6 125/100 M1 wheel – 100% concentration under combined electro-diamond grinding:

$v_{gwh} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,05$ мм/dv.stroke; $i_{пр} = 0,6$ А/см²; $i_{тр} = 4$ А/см²

Исследования удельного расхода алмазных кругов свидетельствуют об экстремальном характере зависимостей от электрических параметров: плотности тока правки и плотности тока травления. Расход кругов при комбинированном методе составляет 1,0...1,5 мг/г, что

ниже в сравнении с известными, при обычном шлифовании, в 3...4 раза.

На рис. 10 а, б, в показаны состояние режущей кромки инструмента со стороны

передней поверхности (рис. 10, а) и вторичные структуры в составе диборида циркония после шлифования (рис. 10, б, в).

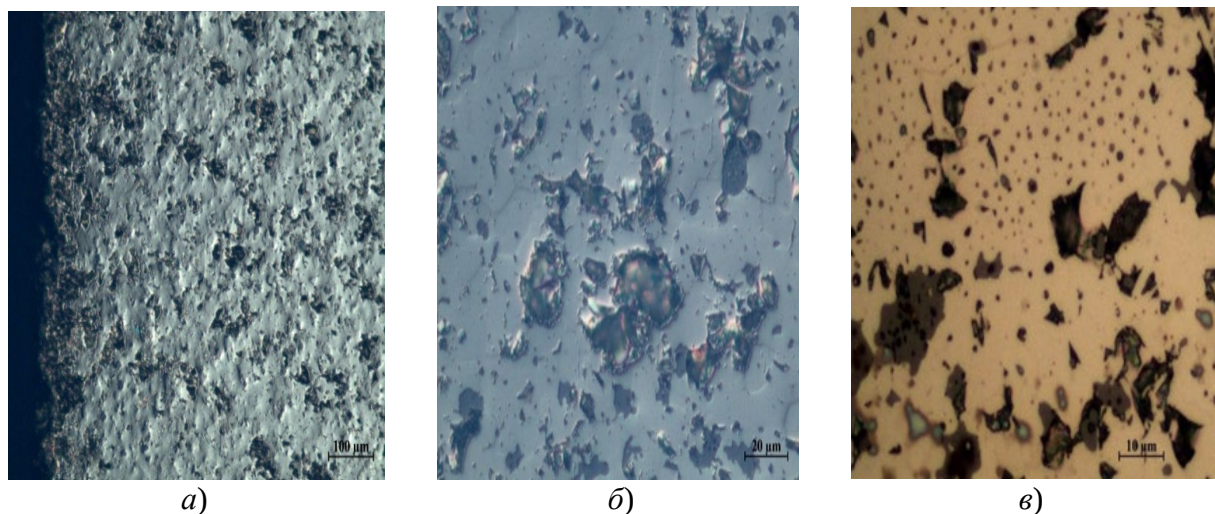


Рис. 10. Состояние кромки и структуры обработанной поверхности материала ZrB_2 после комбинированного электроалмазного шлифования:

$v_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,05$ мм/дв.ход; $i_{пр} = 0,6$ А/см²; $i_{тр} = 4$ А/см²

Fig. 10. The state of the edge and structure of the treated surface of the ZrB_2 material after combined electro-diamond grinding:

$v_{gwh} = 35$ m/s; $S_{pr} = 1,5$ m/min; $S_{pop} = 0,05$ mm/dv.stroke; $i_{pr} = 0,6$ A/cm²; $i_{tr} = 4$ A/cm²

Закключение

В результате проведенных исследований установлено, что применение комбинированного электроалмазного метода позволяет выполнять шлифование керамических композитов на основе диборида-циркония с пониженным в 3...4 раза расходом алмазного круга, по сравнению с традиционным шлифованием.

Установлены рациональные параметры технологии электроалмазного шлифования для керамики на основе ZrB_2 : скорости резания $v_{кр} = 35$ м/с; продольной подачи $S_{пр} = 0,5...1,5$ м/мин; поперечной подачи $S_{поп} = 0,02...0,05$ мм/дв.ход; плотности тока правки алмазного круга $i_{пр} = 0,2...0,6$ А/см²; плотности тока травления поверхности обрабатываемого изделия $i_{тр} = 4...6$ А/см².

Представленные исследования дополняют полученные ранее результаты, хорошо согласуются с результатами работ [17, 18], гарантируют качество изготавливаемых изделий из высокопрочных композиционных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крутский Ю.Л., Гудыма Т.С., Дюкова К.Д., Кузьмин Р.И., Крутская Т.М. Дибориды некоторых переходных металлов: Свойства, область применения и методы получения, Ч. 2. Дибориды хрома и циркония (обзор) // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 395–412.
2. Bakshi S.D., Basu B., Mishra S.K. Microstructure and mechanical properties of sinter-HIPed ZrO_2 – ZrB_2 composites // Composites. 2006. Part A 37. P. 2128–2135.
3. Microstructure and mechanical properties of ZrB_2 –Nb composite / X. Sun., W. Han, P. Hu [et. al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2010. Vol. 28. P. 472–474.
4. Preparation of ZrB_2 based hybrid composites reinforced with SiC whiskers and SiC particles by hot-pressing / D. Chen, L. Xu, X. Zhang [et.al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2009. Vol. 27. P. 792–795.
5. Guo S.Q. Densification of ZrB_2 -based composites and their mechanical and physical properties: A review // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. P. 995–1011.
6. Степанов И.А., Скрипняк В.А., Андриец С.П. и др. Исследование закономерностей уплотнения наноструктурной керамики на основе диборида циркония при горячем прессовании // Ядерная физика и

инжиниринг. 2011. Т. 2. № 3. С. 1–16.

7. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Ваганова И.К., Янюшкин А.С., Скрипняк В.В., Лобанов Д.В. Механические свойства наноструктурной керамики на основе диборида циркония // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 7/2. С. 119–123.

8. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Петров Н.П. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов // СТН. 2010. № 11. С. 2–4.

9. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6–13.

10. Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 9 (111). С. 40–48.

11. Киричек А.В., Федонин О.Н., Хандожко А.В., Жирков А.А., Соловьев Д.Л., Баринов С.В. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8(134). С. 31–38.

12. Смоленцев В.П., Ненахов Н.Н., Извеков А.А., Стародубцев И.Г. Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 7 (133). С. 3–8.

13. Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Извеков А.А. Расширение области использования в машиностроении комбинированных научных технологий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 188–192.

14. Болдырев А.И., Усов С.В., Болдырев А.А., Мандрыкин А.В. Экспериментальные исследования технологических возможностей электрохимического формообразования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3-1. С. 120–122.

15. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 336 с.

16. Пат. 2304504 RU, МПК B24B53/00, B23H3/00. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления / А. С. Янюшкин, А. А. Сурьев и др.; патентообладатель Братский гос. ун-т. 2010. Заявл. 31.01.05; опубл. 20.08.07, Бюл. 23.

17. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: Монография / Тонкие научные технологии. Старый Оскол. 2012. 296 с.

18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Батаев В.А., Архипов П.В., Медведева О.И. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 87–91.

REFERENCES

1. Krutskiy Yu.L., Gudyma T.S., Dyukova K.D., Kuzmin R.I., Krutskaya T.M. Diborides of transition metals: Properties, application and production. review. Part 2. Chromium and zirconium diborides // Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 395–412.

2. Bakshi S. D., Basu B., Mishra S. K. Microstructure and mechanical properties of sinter-HIPed ZrO₂–ZrB₂ composites // Composites. 2006. Part A 37. P. 2128–2135.

3. Microstructure and mechanical properties of ZrB₂–Nb composite / X. Sun., W. Han, P. Hu [et. al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2010. Vol. 28. P. 472–474.

4. Preparation of ZrB₂ based hybrid composites reinforced with SiC whiskers and SiC particles by hot-pressing /D. Chen, L. Xu, X. Zhang [et.al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2009. Vol. 27. P. 792–795.

5. Guo S.-Q. Densification of ZrB₂-based composites and their mechanical and physical properties: A review // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. P. 995–1011.

6. Stepanov I.A., Skripnyak V.A., Andriets S.P et al. Investigation of the compaction patterns of nanostructured ceramics based on zirconium diboride during hot pressing // Nuclear Physics and Engineering. 2011, vol. 2, no. 3, pp. 1–16.

7. Skripnyak V.A., Skripnyak E.G., Vaganova I.K., Yanushkin A.S., Skripnyak V.V., Lobanov D.V. Mechanical properties of nanostructured ceramics based on zirconium diboride // Izvestiya vuzov. Physics, 2012, vol. 55, no. 7/2, pp. 119–123.

8. Lobanov D.V., Yanushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composite // СТН, 2010, no. 11, pp. 2–4.

9. Rychkov D.A., Skripnyak V.A., Yanushkin A.S., Lobanov D.V. Development of preparation technology of the cutting tools for layered composite materials treatment // Metalworking (technology, equipment, tools), 2014, no. 2 (63), pp. 6–13.

10. Makarov V.F., Volkovsky A.A., Sabirzyanov A.I. Increase of productivity and composite abrasion quality based on choice and abrasive tool rational use // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 9 (111), pp. 40–48.

11. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Zhirkov A.A., Soloviev D.L., Barinov S.V. Hybrid technologies and technical equipment for additive synthesis of products // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8(134), pp. 31–38.

12. Smolentsev V.P., Nenakhov N.N., Izvekov A.A., Starodubtsev I.G. Additive processing technologies of tool engineering for combined tooling techniques // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 7(133), pp. 3–8.

13. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Izvekov A.A. Expanding the field of use of combined science-intensive technologies in mechanical engineering // Bulletin of the Voronezh State Technical University, 2024, vol. 20, no. 2. pp. 188–192.

14. Boldyrev A.I., Usov S.V., Boldyrev A.A., Mandrykin A.V. The experimental evaluation of technological facilities varieties in method of electrochemical shaping // Bulletin of the Voronezh State Technical University, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 120–122.

15. Yanushkin A. S. Technology of electro-diamond sharpening of cutting tools and methods of its realization: monograph / A. S. Yanushkin. – Stary Oskol: TNT publ., 2013, 336 p.

16. Pat. 2304504 RU, IPC B24B 53/00, B23N 3/00. Method of automatic control of the process of continuous electrochemical disk truing and a device for its implementation / A. S. Yanushkin, A. A. Suryev et al.; patent holder

Bratsk State University. 2010. Appl. 31.01.05; published. 20.08.07, Bul. 23.

17. Lobanov D.V., Yanushkin A.S. Tooling backup technology for composite non-metallic materials manufacturing: a monograph. Fine high-tech technologies, Stary Oskol, 2012, 296 p.

18. Yanushkin A.S., Lobanov D.V., Bataev V.A., Arkhipov P.V., Medvedeva O.I. Investigations of the operability of diamond wheels in processing composite materials. Methods. Technologies, 2010, no. 3 (7), pp. 87–91.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.11.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 24.12.2024.

The article was submitted 17.11.2024; approved after reviewing 22.11.2024; assepted for publication 24.12.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.02.2025. Выход в свет 28.02.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Брянский государственный технический университет» 241035,
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

